

Alternatieve waterkeringen

Een verkenning naar nieuwe concepten voor
kustverdediging in het kader van Beleid Ondersteuning
Programmabureau Zuidwestelijke Delta

Marijn Tangelder & Tom Ysebaert
Rapport C069/12



IMARES Wageningen UR

(IMARES - Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies)

Opdrachtgever:

Ministerie EL&I, Directie RRE
Postbus 6111
5600 HC Eindhoven

BO-11-015-004

Publicatiedatum:

Juni 2012

IMARES is:

- een onafhankelijk, objectief en gezaghebbend instituut dat kennis levert die noodzakelijk is voor integrale duurzame bescherming, exploitatie en ruimtelijk gebruik van de zee en kustzones;
- een instituut dat de benodigde kennis levert voor een geïntegreerde duurzame bescherming, exploitatie en ruimtelijk gebruik van zee en kustzones;
- een belangrijke, proactieve speler in nationale en internationale mariene onderzoeksnetwerken (zoals ICES en EFARO).

P.O. Box 68	P.O. Box 77	P.O. Box 57	P.O. Box 167
1970 AB IJmuiden	4400 AB Yerseke	1780 AB Den Helder	1790 AD Den Burg Texel
Phone: +31 (0)317 48 09 00	Phone: +31 (0)317 48 09 00	Phone: +31 (0)317 48 09 00	Phone: +31 (0)317 48 09 00
Fax: +31 (0)317 48 73 26	Fax: +31 (0)317 48 73 59	Fax: +31 (0)223 63 06 87	Fax: +31 (0)317 48 73 62
E-Mail: imares@wur.nl	E-Mail: imares@wur.nl	E-Mail: imares@wur.nl	E-Mail: imares@wur.nl
www.imares.wur.nl	www.imares.wur.nl	www.imares.wur.nl	www.imares.wur.nl

© 2011 IMARES Wageningen UR

IMARES is onderdeel van Stichting DLO
KvK nr. 09098104,
IMARES BTW nr. NL 8113.83.696.B16

De Directie van IMARES is niet aansprakelijk voor gevolgschade, noch voor schade welke voortvloeit uit toepassingen van de resultaten van werkzaamheden of andere gegevens verkregen van IMARES; opdrachtgever vrijwaart IMARES van aanspraken van derden in verband met deze toepassing.

Dit rapport is vervaardigd op verzoek van de opdrachtgever hierboven aangegeven en is zijn eigendom. Niets uit dit rapport mag weergegeven en/of gepubliceerd worden, gefotokopieerd of op enige andere manier gebruikt worden zonder schriftelijke toestemming van de opdrachtgever.

A_4_3_1-V12.2

Voorwoord

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen Beleidsondersteunend onderzoek in het kader van EL&I-programma's en Deltaprogramma Zuidwestelijke Delta (BO-11-015-004) en betreft taak 2 "Alternatieve waterkeringen". Tijdens het onderzoekstraject heeft afstemming plaatsgevonden met de verkenning Innovatieve Dijken in het Waddengebied voor het Deelprogramma Wadden van het Deltaprogramma. Daarbij willen we Jantsje van Loon-Steensma (Alterra) graag bedanken voor het reviewen van dit rapport. Voor een aantal concepten is extra informatie bekomen uit het *Building with Nature* programma van Ecoshape (www.ecoshape.nl), waar wordt verkend hoe de Zuidwestelijke Delta op de lange termijn (2100) veilig kan zijn en waarbij gebruik wordt gemaakt van natuurlijke processen om de kust te versterken. Afgelopen jaren zijn er verschillende studies uitgevoerd die nieuwe vormen van kustverdediging beschrijven (onder andere Van der Zwan & Tromp (2010), Baptist (2011) en Fiselier, Jaarsma *et al.* (2011)). In dit rapport ligt de nadruk op alternatieve vormen van kustverdediging of aanpassingen/toevoegingen aan huidige keringen in getijdensystemen die meer ruimte bieden voor natuurlijke processen of deze zelfs benutten om de kust- en getijdezone veiliger (robuuster) te maken. Daarnaast wordt aandacht besteed aan de kansen die deze alternatieve waterkeringen bieden voor andere functies en medegebruik.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	5
1 Inleiding.....	8
1.1 Aanleiding	9
1.2 Doel	9
1.3 Werkwijze.....	9
1.4 Leeswijzer	10
2 Kustverdediging in de delta van vroeger tot nu.....	11
2.1 Kustverdediging en landaanwinning door de eeuwen heen 1100-1950.....	11
2.2 Deltawerken	12
2.3 Kustverdediging anno nu	12
2.4 Nieuwe opgaven.....	13
3 Analyse conventionele keringen	16
3.1 Voordelen van dijken.....	16
3.2 Nadelen van dijken	16
4 Definiëren alternatieve waterkeringen	18
4.1 Buitendijkse mogelijkheden.....	19
4.1.1 Inzet "biobouwers": schelpdierriffen & aanplanten	19
4.1.2 duinen en schorren	19
4.1.2 Slim met zand: strategisch suppleren	21
4.2 Aanpassing dijken.....	23
4.2.1 Klimaatdijk	23
4.2.2 Duindijk	24
4.2.3 Rijke dijk.....	26
4.3 Binnendijkse gebiedsontwikkeling.....	27
4.3.1 Inlaag.....	28
4.3.2 Sedimentatiegebieden	29
4.3.3 Mogelijkheden voor aquacultuur	36
5 Toepassing Oosterschelde	37
5.1 Huidige situatie	37
5.2 Alternatieve waterkeringen in de Oosterschelde.....	37
6 Conclusie en discussie	40
7 Referenties	43
8 Kwaliteitsborging en Verantwoording	47
9 Verantwoording	48
Bijlage A. Samenvatting BwN workshop Lange termijn visie ZWD.....	49

Samenvatting

Dit onderzoek is onderdeel van het Beleid Ondersteuning 2011 Deltaprogramma Zuidwestelijke Delta (BO-11-015-004) van het Ministerie van EL&I. Deze studie is onderdeel van een 5-tal taken en betreft taak 2 Alternatieve waterkeringen. Klimaatverandering en de daarmee samenhangende zeespiegelstijging, extremere stormen en hogere piekafvoeren van de rivieren leiden tot nieuwe opgaven voor kustverdediging in de Zuidwestelijke Delta. Deze ontwikkelingen vragen om flexibele en robuuste waterkeringen die veilig zijn maar ook mogelijkheden bieden voor aanpassingen (adaptief beheer). In de kennisagenda van de Zuidwestelijke Delta (waterveiligheid) is de volgende vraag benoemd: *"In hoeverre zijn nieuwe concepten voor keringen (zoals Deltadijken) of gebiedsinrichting (bijvoorbeeld binnendijkse compartimentering) nodig en bruikbaar?"* Dit rapport heeft daarom tot doel om nieuwe concepten voor keringen en kansen voor inbedding van deze concepten in en rondom de Oosterschelde te inventariseren. Het eerste deel van de studie betreft een algemene inventarisatie van nieuwe concepten in getijdensystemen die daardoor ook relevant zijn voor andere Deelprogramma's (zoals Kust en Waddenzee).

Het grootste deel van de Nederlandse kust wordt beschermd door stranden en duinen die jaarlijks worden gesuppleerd. In de Zuidwestelijke Delta op de koppen van de eilanden is dit ook zo, maar in de Oosterschelde en Westerschelde zijn het vooral de dijken die in kustverdediging voorzien. Dijken zijn al eeuwenlang een effectieve manier van kustverdediging en hebben ze een belangrijke rol gespeeld in het uitbreiden en inpolderen van nieuw land. Gemaakt van gebiedseigen materiaal kunnen ze relatief gemakkelijk aangepast (opgehoogd of verstevigd) worden en zijn ze een relatief goedkope oplossing voor laaggelegen kustgebieden met een lage grondprijs (Brampton 2002). Echter zorgen dijken ook voor een steeds groter wordend hoogte verschil tussen een stijgende zeespiegel en een inklinkende bodem. Doordat ze statisch zijn, zijn dijken niet gemakkelijk aan te passen op veranderende omstandigheden zoals zeespiegelstijging en belemmeren ze natuurlijke sedimentatie. Daarnaast zorgt een groter verhang tussen land en zee ervoor dat als de dijk breekt de impact van een overstroming groter is. Ook veroorzaakt dit een toename in zoute kwel binnendijks.

"Alternatieve keringen" zijn nieuwe typen (of aanpassingen aan) keringen die veiligheid bieden tegen overstromingen maar ook gericht zijn op meer ruimte voor natuurlijke processen (zie figuur op de volgende bladzijde). De mogelijkheden voor nieuwe typen keringen hangen nauw samen met lokale omstandigheden. Alternatieve waterkeringen zoals besproken in deze studie resulteren doorgaans in bredere keringen die in zee- en/of landwaartse richting zijn uitgebreid en bieden meer mogelijkheden voor medegebruik zoals aquacultuur, natuur en recreatie dan reguliere dijken. Bredere keringen zijn robuuster en kunnen een rol vervullen in het ecologisch functioneren van de aanliggende wateren van belang voor de ecologische veerkracht van het systeem (zie BO taak 1 Ecologische begrippen). Type keringen gericht op het vasthouden van sediment en bevorderen van sedimentatie kunnen onder de juiste randvoorwaarden meestijgen met de zeespiegelstijging (zoals Sedimentatiegebieden of buitendijkse slikken en schorren) en op lange termijn bijdragen aan een robuuste kustzone.

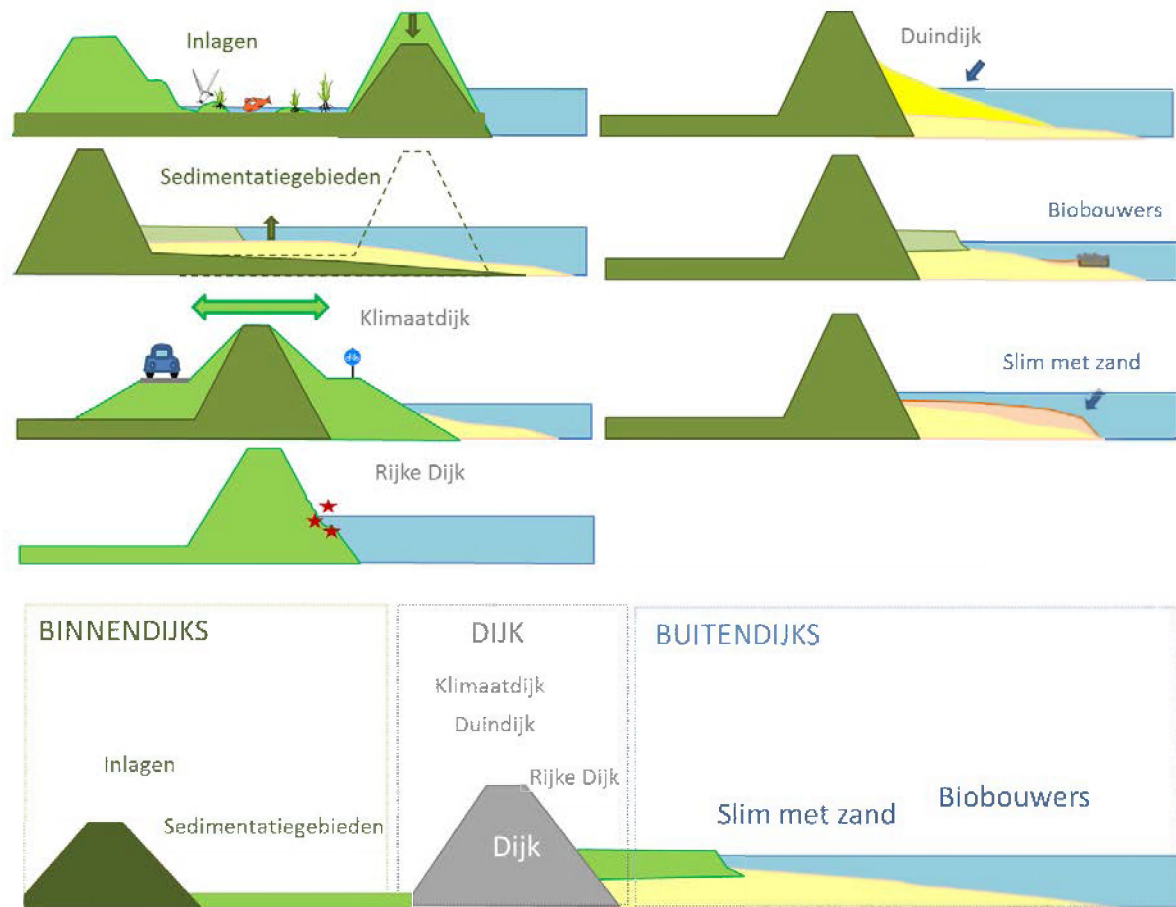
Buitendijkse concepten bestaan uit behoud of uitbreiden van voorlanden waardoor de golfaanval op de kust afneemt en meer intergetijdengebied ontstaat met waardevol habitat voor mariene en estuariene soorten zoals gebruik van schelpdier riffen of (strategisch suppleren). Nieuwe concepten voor aanpassingen aan de dijk zelf zijn gericht op het veiliger en/of ecologisch aantrekkelijker maken met kansen voor mede gebruik zonder dat deze hoeft worden opgehoogd. Binnendijkse maatregelen zijn erop gericht de kustverdediging in binnendijkse richting te verbreden naar een kustzone met een meer geleidelijke overgang tussen land en zee. Zo is het Inlagen concept een manier om overstromingsrisico's te zoneren door gebruik van dubbeldijken waarbij de veiligheidsnorm voor de primaire dijk lager kan zijn. Bij toepassing van Sedimentatiegebieden wordt binnendijks gebied onder invloed van het getij

gezet. Onder de juiste randvoorwaarden treedt schorvorming op waardoor het gebied kan opslibben en kan meegroeien met de zeespiegelstijging. Dit draagt bij aan een robuuste, veilige kustzone en is daarnaast ook een manier om verlies van intergetijdengebied te compenseren bijvoorbeeld als habitat herstel in het kader van Natura 2000.

De veiligheid langs de Oosterschelde wordt gewaarborgd door dijken en bij extreem hoog water (>3m NAP) gaat de stormvloedkering dicht. Naast de waardevolle ecologische waarde van het gebied is de Oosterschelde ook van groot belang voor de schelpdiersector en aantrekkelijk voor waterrecreatie (met name voor duikers). Door de zandhonger staan de natuurwaarden onder druk en als gevolg hiervan eroderen intergetijdengebieden en neemt de golfbelasting op de dijken toe. Kansen voor alternatieve waterkeringen in de Oosterschelde zijn met name de Inlagen, toepassing van Oesterriffen en Nieuwe dijken zoals Klimaatdijk, Duindijk en Rijke Dijk. Het lopende experiment met oesterriffen moet echter hun werking nog uitwijzen. Door een sedimenttekort in de Oosterschelde en de relatief lage sedimentlading van het water hebben Sedimentatiegebieden weinig potentie doordat ze niet genoeg sediment zullen ontvangen om de zeespiegelstijging bij te houden. Zo heeft de Westerschelde meer potentie voor toepassing van Sedimentatiegebieden omdat de sedimentbeschikbaarheid daar veel hoger is.

De alternatieve waterkeringen besproken in deze studie zijn nog jonge concepten in ontwikkeling. Sommigen worden al ingezet als kustverdediging of natuurherstelmaatregel (zoals Sedimentatiegebieden (Verenigd Koninkrijk)) en andere zijn nog meer in een onderzoeks-/pionierfase (Schelpdierriffen, Strategisch suppleren, Inlagen, Duindijk, Rijke Dijken) of zelfs nog een concept wat nog niet is toegepast (Klimaatdijk). Om de werking en mogelijkheden voor toepassing beter te begrijpen is meer ervaring, onderzoek en monitoring van bestaande concepten nodig. De kennis die hieruit ontwikkelt kan worden geeft voeding aan de strategiekeuze voor de lange termijn veiligheid van de Zuidwestelijke Delta.

Alternatieve waterkeringen



1 Inleiding

Klimaatverandering en de daarmee samenhangende zeespiegelstijging, extremere stormen en hogere piekafvoeren van de rivieren leiden tot nieuwe opgaven voor kustverdediging in de Zuidwestelijke Delta. Deze ontwikkelingen vragen om flexibele en robuuste waterkeringen die veilig zijn maar ook mogelijkheden bieden voor aanpassingen (adaptief beheer). De dijken hebben ons land eeuwenlang beschermd tegen de zee en bieden effectieve bescherming tegen overstromingen. Aan de andere kant verminderen ze de natuurlijke morfologische dynamiek waardoor de kustzone zou kunnen meegroeien met de zee. Daarnaast wordt door zeespiegelstijging en een inklinkende bodem het verschil tussen zee- en landniveau steeds groter.

De Deltawerken bieden bescherming tegen de zee en garanderen samen met de dijken de veiligheid van de Zuidwestelijke Delta. Tegelijkertijd staat het natuurlijke systeem, de waterkwaliteit en ook de economie in de delta hierdoor onder druk (Zuidwestelijke Delta 2010). Door de afsluiting van de delta met dammen en het scheiden van de deltawateren onderling is, met uitzondering van de Westerschelde en de Oosterschelde, de oorspronkelijke dynamiek van eb en vloed vrijwel weggefallen. Het estuariene ecosysteem met uitgestrekte zandplaten, slikken en schorren is grotendeels veranderd in stagnante zoet-, brak- en zoutwater meren. Dit leidt tot verschillende problemen zoals de zuurstofloosheid in de Grevelingen (Wijsman 2002; Lengkeek, Bouma et al. 2007). In de Oosterschelde is de getijdendynamiek weliswaar (gedeeltelijk) behouden, maar de Deltawerken resulteerden wel in een verstoord morfologisch evenwicht waardoor erosie van het intergetijdengebied optreedt (Van Zanten and Adriaanse 2008). Door inpolderingen langs de Westerschelde en het verruimen en verdiepen van de vaarweg, met het bijbehorende continue onderhoudsbaggerwerk, is de estuariene natuur achteruit gegaan en dringt het getij verder en sneller door tot voorbij Antwerpen. Een stijgende zeespiegel zal er tevens voor zorgen dat het areaal slikken en schorren voor de dijken verder zal afnemen en afkalven. Als de golfdempende werking van de intergetijdengebieden verloren gaat, heeft dit een grotere aanval op de dijken en daarmee op de veiligheid van de achterliggende polders tot gevolg. Naast de veiligheid zijn slikken, schorren en ondiepe wateren waardevolle habitats die van groot belang zijn voor trekvogels, broedvogels, vissen en zeehonden, zowel nationaal als internationaal. De Oosterschelde koestert waardevolle natuurwaarden en is benoemd tot Nationaal Park (2002) en aangewezen als Vogel- en Habitatrichtlijn gebied in het kader van de Europese Natura 2000 richtlijn. De andere bekkens van de Delta zoals het Haringvliet, Grevelingen en Westerschelde vallen tevens onder Natura 2000. De Westerschelde is de enige zeearm in de Zuidwestelijke Delta waar de verbinding tussen zee en rivier nog volledig in tact is.

De nadelen van een harde scheiding tussen land en zee en tussen watersystemen worden steeds evidenter zoals het steeds groter wordende verschil tussen een stijgende zeespiegel en een dalende bodem. Meer en meer aandacht gaat uit naar het onderzoeken van alternatieve vormen van kustverdediging die flexibeler, duurzamer en (op termijn) goedkoper zijn, ruimte bieden aan natuurlijke processen in plaats van deze te belemmeren en kansen bieden voor medegebruik. Dit kan zijn door buitendijkse voorzieningen zoals eco-engineering met schelpdieren of schorren, aanpassingen aan de waterkering zelf door de dijk te verbreden in plaats van op te hogen (klimaatdijk) of zelfs een verbreding van de hele kuststrook. Zo schept een breder, meer geleidelijk overgangsgebied tussen zee en kust kansen om de kuststrook te laten meegroeien met de zeespiegelstijging door natuurlijke sedimentatie en zijn er mogelijkheden voor medegebruik. Echter vraagt dit ook om een grootschalige ontwikkeling en ruimtebeslag en dit is niet overal mogelijk. Een overzicht en beschrijving van alternatieve vormen van kustverdediging kan helpen bij het vergroten van het inzicht in de mogelijkheden en de toepassing ervan.

1.1 Aanleiding

Op de langere termijn speelt de vraag of de regio flexibel om kan gaan met de gevolgen van klimaatverandering (Deltacommissie, 2008) en slim weet in te spelen op de toekomstige sociaaleconomische randvoorwaarden, kansen en risico's. Het Deltaprogramma Zuidwestelijke Delta verkent welke ontwikkelingsrichtingen perspectief bieden op de langere termijn (2050-2100), binnen de bandbreedte van de sociaal-economische en klimatologische toekomstscenario's (Zuidwestelijke Delta 2010).

In de kennisagenda van de Zuidwestelijke Delta (waterveiligheid) is de volgende vraag benoemd: *"In hoeverre zijn nieuwe concepten voor keringen (zoals Deltadijken) of gebiedsinrichting (bijvoorbeeld binnendijkse compartimentering) nodig en bruikbaar?"*

Een inventarisatie van kennis over nieuwe concepten keringen en kansen voor inbedding van deze concepten in de Oosterschelde vormt het doel van dit rapport.

1.2 Doel

Dit onderzoek is onderdeel van het Beleid Ondersteuning 2011 Deltaprogramma Zuidwestelijke Delta (BO-11-015-004) van het Ministerie van EL&I. Het project is onderverdeeld in een 5-tal taken.

- 1 Onderzoek naar ecologische concepten en begrippen in de delta
- 2 Alternatieve waterkeringen
- 3 Effecten van veranderd peil op habitats
- 4 Effecten van veranderende nutriëntendynamiek op productiviteit
- 5 Droogte en zoetwatervoorziening Zuidwestelijke Delta: betekenis en adaptatiekansen voor natuur

Onderhavig rapport is het resultaat van taak 2, en hierin wordt een overzicht gegeven van alternatieve vormen van kustverdediging of aanpassingen/toevoegingen aan huidige keringen die meer ruimte bieden voor natuurlijke processen of deze zelfs benutten om de kust- en getijdzone veiliger (robuuster) te maken, bijv. door te laten meegroeien met de zeespiegel. Daarnaast wordt aandacht besteed aan de kansen die deze alternatieve waterkeringen bieden voor andere functies en medegebruik. De nadruk in dit rapport ligt op een globale beschouwing van verschillende concepten en ideeën voor nieuwe vormen van kustverdediging. Er worden geen concrete berekeningen gedaan met betrekking tot waterveiligheid en kosten. Dit vergt een diepte studie die de toepassing locatie specifiek onderzoekt. Tot slot wordt uitgewerkt welke delen in en rondom de Oosterschelde kansrijk zijn voor toepassing van bepaalde typen alternatieve waterkeringen. Gekozen is voor de Oosterschelde omdat met name hier een natuuropgave ligt en kustverdediging die meer ruimte laat voor natuurlijke processen kan bijdragen om de natuurdoelstellingen te verwezenlijken.

1.3 Werkwijze

Er is veel in ontwikkeling op het gebied van nieuwe, duurzamere en economischere concepten voor kustverdediging en er is ook al veel over geschreven (Van der Zwan and Tromp 2010; De Bel, Schomaker et al. 2011; Fiselier, Jaarsma et al. 2011; Van Loon-Steensma, Schelfhout et al. 2012; De Mesel, Ysebaert et al. 2012 (in preparation)). Deze verkenning spitst zich voornamelijk toe op de ecologische meerwaarde van nieuwe concepten en de mogelijkheden voor (nieuwe) vormen van gebruik zoals aquacultuur en zilte teelten. Daarvoor zijn op basis van relevante literatuur, beschikbare onderzoeksrapporten, verschillende websites en communicatie met deskundigen (in bijlage 1 is het verslag opgenomen van een workshop met deskundigen in het kader van *Building with Nature* Lange Termijn visie Zuidwestelijke Delta) meerdere nieuwe concepten kustverdediging verkend. Er is voornamelijk gelet op concepten die toegepast kunnen worden in de Zuidwestelijke Delta. Allereerst is er een overzicht gemaakt van nieuwe concepten voor kustverdediging variërend van theoretische concepten tot methoden die al in de praktijk worden toegepast en is een indeling gemaakt op basis van binnen- en

buitendijkse toepassingen en aanpassingen aan de dijk zelf. Tot slot is verkend welke concepten geschikt zijn voor toepassing in de Oosterschelde en is een kansenkaart gemaakt die aangeeft waar deze concepten kunnen worden toegepast. De werkwijze bij het ontwikkelen van deze kansenkaart wordt in hoofdstuk 5 toegelicht.

1.4 Leeswijzer

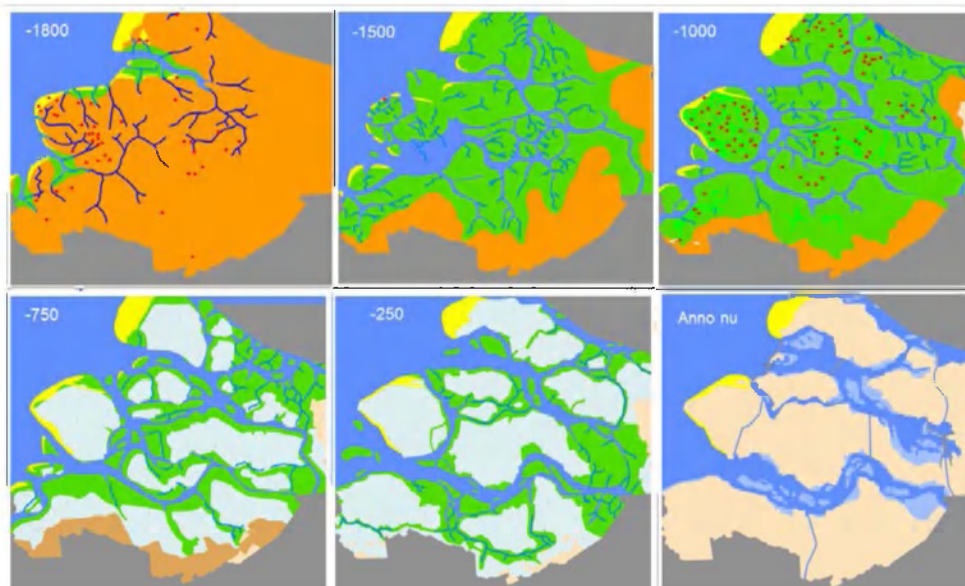
Dit rapport is als volgt opgebouwd: Hoofdstuk 2 beschrijft de evolutie van kustverdediging in de delta, hoe dit in de huidige situatie is georganiseerd en schetst het beleidskader. Vervolgens geeft Hoofdstuk 3 een analyse van voor- en nadelen van conventionele keringen gevolgd door Hoofdstuk 4 waarin verschillende nieuwe concepten waterkeringen voor getijdensystemen worden besproken. Dit betreft een algemene inventarisatie die ook relevant is voor andere Deelprogramma's zoals Kust en Wadden. In Hoofdstuk 5 wordt vervolgens een concretiseringslag gemaakt en kansen en mogelijkheden voor toepassing van alternatieve waterkeringen in de Oosterschelde aangegeven. Er is gekozen voor de Oosterschelde omdat juist in deze zeearm de spanning tussen waterbouwkundige werken en ecologie actueel is als gevolg van de zandhonger. Alternatieve waterkeringen zouden oplossingen kunnen bieden voor meer synergie tussen veiligheid en meer ruimte voor natuurlijke processen.

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het kader van het EL&I-programma Beleidsondersteunend Onderzoek thema Gebiedsgerichte Deltaprogramma's

2 Kustverdediging in de delta van vroeger tot nu

2.1 Kustverdediging en landaanwinning door de eeuwen heen 1100-1950

Reeds in de 11^e eeuw vonden de eerste bedijkingen plaats in de Zuidwestelijke Delta, waar mensen poogden de vruchtbare, laaggelegen gronden te bebouwen en droog te houden. In die tijd waren de dijken niet meer dan bescheiden kaden, wellicht voldoende om hoogtij tegen te houden maar onvoldoende om een storm te doorstaan. In het begin werd klei voor de dijken aangevoerd in rieten manden en opgeschept tot kaden. Later, met de intrede van de kruiwagen, werd het grondverzet vergemakkelijkt. Al in de 12^e eeuw ontstonden volledig bedijkte gebieden en ontwikkelde men kanaaltjes om kwelwater af te voeren en het drassige land geschikt te maken voor landbouw. Omstreeks 1300 had de landaanwinning en dijkenbouw een dusdanige vorm aangenomen dat de contouren van de huidige eilanden in de delta zichtbaar werden (Figuur 1). Dijken werden gemaakt van zand- en kleilichamen, beschermd met wilgentenenmatten en verzaamd met keien om erosie aan de voet van de dijk tegen te gaan.



Figuur 1, ontwikkeling van de Zeeuwse eilanden (bron: Provincie Zeeland)

Echter in de 14^e en 15^e eeuw volgden hevige stormvloed (waaronder St. Elizabethsvloed 1421, St.Felix-vloed 1530 en stormvloed in de jaren 1532, 1552 en 1570) elkaar op waardoor dijken bezweken of ondermijnd werden door stroming en grote delen van de eilanden onder liepen. De inham aan de zuidkust van Schouwen-Duiveland is hiervan een gevolg. Hier creëerde men "inlagen" waar in verband met het risico van wegzakken van de zeedijk een inlaagdijk als reserve waterkering werd aangelegd. De overstromingen hadden tot gevolg dat vanuit het landbestuur maatregelen werden genomen om tot één gezamenlijk dijkbeheer te komen en de bewoners van de polders mee te laten betalen aan het onderhoud. Dit moest ervoor zorgen dat dijken in goede staat bleven en men niet verrast zou worden door een stormvloed.

Vanaf 1600 nam landaanwinning gestaag toe, gebruikmakend van bemaling door molens. Aan de polderstructuur in de Zak van Zuid-Beveland is nog goed te zien hoe parallelle slaperdijken (voormalige zeedijken) elkaar opvolgen in het landschap. Ook werden de verschillende eilanden zoals Schouwen en Duiveland en Walcheren en Zuid-Beveland aan elkaar verbonden. In het begin van de 20^{ste} eeuw gebruikte men slijkgras (*Spartina anglica*), geïntroduceerd vanuit Engeland, om aanslibbing van land te bevorderen. Zo is ook het Sloe ontstaan en zijn delen van het Land van Saeftinghe in de Westerschelde snel aangeslibd en opgehoogd. Door de ervaring met dijkenbouw verbeterden de dijkbouwtechnieken en

bleven grootschalige overstromingen als gevolg van stormvloed en uit. Tot aan de rampennacht van 1 februari 1953 waarbij door het samenvallen van een krachtige zuidwesterstorm en springtij op verschillende plaatsen dijken braken. Circa 150.000 ha land in Zeeland, Zuid-Holland en Brabant liep onder en 1835 mensen kwamen om het leven.

2.2 Deltawerken

De watersnoodramp versnelde de planvorming en financiering rondom het afsluiten van verschillende zeearmen om de kustlijn te verkorten. Dit mondde uit in het Deltaplan, wat onder andere voorzag in de volledige afsluiting van Veerse Gat (1961), Grevelingen (1964) en Haringvliet (1970) (Figuur 2). In eerste instantie zou de Oosterschelde ook afgesloten worden met een dam. Zwaar protest vanuit natuurorganisaties en de schelpdiersector waarvoor het zoutwater milieu een belangrijke bron van inkomsten is, zorgde voor een aangepast ontwerp van de dam: een stormvloedkering die alleen bij extreem hoog water zou sluiten. Het besluit om een open kering in de Oosterschelde te bouwen, had een aantal gevolgen. De verbinding tussen de Oosterschelde en de zee was wel gehandhaafd, en de getijdewerking grotendeels behouden, toch is er sprake van een verstoring van het morfologisch evenwicht. Het getijvolume van het in- en uitstromende water is afgenomen, mede door de aanleg van de compartimenteringsdammen (Oosterdam, Grevelingendam en Philipsdam). De Oosterschelde ontwikkelt zich naar een nieuw evenwicht waarbij de geulen zich opvullen met zand dat afkomstig is van de slikken en platen ("zandhonger"). Als gevolg hiervan neemt het areaal aan intergetijdengebied af. Door de bouw van de verschillende compartimenteringswerken ontstonden tevens afgesloten zoete wateren (Krammer-Volkerak, Zoommeer en Markiezaatsmeer) en zorgde ervoor dat water- en sedimentaanvoer vanuit de rivieren naar de bekkens stopte (Mulder, Cleveringa et al. 2010). De dammen hadden als functie om een stabiel waterpeil in de Schelde-Rijnverbinding te garanderen, van belang voor de bereikbaarheid van de Antwerpse haven. Ook speelden de dammen een rol bij verbeterde mobiliteit tussen de eilanden en de waterbeheersing en het milieubeheer van bijvoorbeeld West-Brabant.



Figuur 2, locatie en benaming van de Deltawerken. De Zeelandbrug (1965) behoort niet tot de Deltawerken (Bron: www.deltawerken.com)

2.3 Kustverdediging anno nu

Organisatie & beleid

Met de uitvoering van de Deltawerken en het versterken van de dijken werd de grip op de zee om het land te kunnen beschermen herwonnen. Vandaag de dag zijn het niet meer de eilandbewoners die de dijken onderhouden, maar is bescherming tegen overstromingen landelijk georganiseerd en is dit een kerntaak van Rijkswaterstaat en de waterschappen. Samen met provincies en gemeenten zorgt ze ervoor dat dijken en keringen voldoende bescherming bieden. De Waterwet (2009) is het belangrijkste instrument voor controle en onderhoud van waterkeringen. Elke zes jaar worden waterkeringen getoetst en zo nodig verbeterd in het Hoogwaterbeschermingsprogramma.

Onderhoud van dijk & duin

In 1997 is Bureau Zeeweringen opgericht omdat bleek dat de steenbekledingen van de dijken in Zeeland niet aan de veiligheidseisen voldeden. Dit samenwerkingsverband van Rijkswaterstaat en waterschap Scheldestromen moet in 2015 klaar zijn met het versterken van 325 km dijkbekleding zodat deze dijktrajecten weer aan de normen voldoen. Voor het project is €900 miljoen gereserveerd.

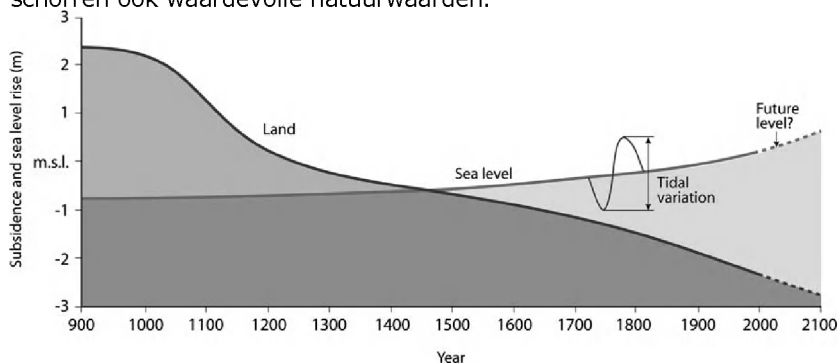
Naast de dijken kent de delta ook duingebieden en stranden zoals de Kop van Schouwen en Goeree, de punt en zuidkust van Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen bij Nieuwvliet die onderhoud behoeven door de

eroderende werking van stroming, golven en getij. Sinds 1990 hanteert men de Basis Kustlijn waarbij de kustlijn zoals die in 1990 was als richtlijn dient voor behoud van de kustlijn. Jaarlijkse strand- en vooroeversuppleties (gemiddeld 12 miljoen kuub per jaar in heel Nederland) zijn erop gericht de kustlijn en aangrenzende duingebieden in stand te houden.

2.4 Nieuwe opgaven

Zeespiegelstijging, extremere stormen en hogere piekafvoeren van de rivieren Rijn en Maas als gevolg van klimaatverandering zijn nieuwe ontwikkelingen en leiden tot nieuwe opgaven voor kustverdediging in de Zuidwestelijke Delta. Het overstromingsrisico in de Zuidwestelijke Delta is relatief klein (1/4000 jaar, en 1/2000 jaar rondom de Biesbosch, 1/1250 jaar voor het Riverengebied en 1/10000 jaar in de Randstad), echter de consequenties van een overstroming zijn zeer groot. Het risico wordt niet alleen bepaald door de kans op een overstroming, maar ook door de gevolgen die een overstroming zou hebben als het gaat om mensenlevens en materiële schade (Ministerie van Verkeer en Waterstaat 2007). Dit maakt het gebied kwetsbaar ook al is het goed beschermd. Het gevaar schuilt niet zo zeer in zeespiegelstijging, waarop geanticipeerd wordt, maar in een groeiende kans op verandering in weersextremen zoals stormen (Vellinga, Marinova et al. 2009). Zware stromen kunnen de kustverdediging onverwacht veel schade toe brengen. De Deltawerken en dijken bieden veiligheid maar het is niet zeker of dit op de lange termijn gewaarborgd is of kan blijven. Daarnaast worden de negatieve invloeden op het natuurlijke systeem (zoals de zandhonger in de Oosterschelde) steeds evidentier. Dit heeft geleid tot een transitie van een sectorale benadering op kustverdediging gericht op de zee zo veel mogelijk buitenhouden met technische oplossingen, naar een meer integrale benadering gericht op meer synergie tussen de technische oplossingen en ruimte voor natuurlijke processen (Vellinga, Marinova et al. 2009).

De nieuwe ontwikkelingen vragen om flexibele en robuuste waterkeringen die veilig zijn maar ook mogelijkheden bieden voor aanpassingen en tegelijkertijd meer ruimte laten voor natuurlijke processen. Terwijl de zeespiegel stijgt hebben we ook te maken met een dalende bodem (Figuur 3). In de Oosterschelde speelt ook de "zandhonger" een rol, een proces waarbij platen en slikken afkalven als gevolg van een zand tekort in de geulen die is ontstaan door de aanleg van de stormvloedkering en compartimenteringsdammen. Deze processen verminderen de golf brekende werking die intergetijdengebieden hebben als bufferend voorland. Tot 2001 verminderde het intergetijdengebied in de Oosterschelde met 0,5 km² per jaar (Van Zanten and Adriaanse 2008). Volgens Jacobse et al. (2008) ging tussen 1990 en 2007, 6 km² intergetijdengebied verloren. Elk jaar verdwijnt er 1 miljoen m³ zand in de geulen. Meer dan 50% van het intergetijdengebied in de Oosterschelde zal verdwenen zijn in 2045 (Van Zanten and Adriaanse 2008). Naast een belangrijke golf brekende functie herbergen slikken en schorren ook waardevolle natuurwaarden.



Figuur 3, bodemdaling en zeespiegelstijging in Nederland (Huisman, Cramer et al. 1998)

Deltaprogramma

De gevolgen van zeespiegelstijging en klimaatverandering maar ook de mogelijkheden voor herstel van estuariene dynamiek in de delta worden momenteel onderzocht door het Deltaprogramma Zuidwestelijke Delta. Dit programma is onderdeel van één van de negen deelprogramma's van het nationale Deltaprogramma. Bestuurders en vertegenwoordigers van provincies en waterschappen uit Noord-Brabant, Zeeland en Zuid-Holland en het Rijk werken in de Stuurgroep Zuidwestelijke Delta aan de korte en lange termijn opgaven voor een veilige delta. Het doel is echter niet alleen veiligheid, maar ook een economisch vitale en ecologisch veerkrachtige delta (Zuidwestelijke Delta 2010). Daarnaast worden er keuzes voorbereid voor de toekomst om ook op de lange termijn veiligheid te kunnen garanderen.

De probleemanalyse voor de lange termijn van het Deltaprogramma (Zuidwestelijke Delta 2011) gaat uit van een maximale zeespiegelstijging van 85 cm in 2100 en een maximale rivierafvoer van 18.000 m³/s. De veiligheidsopgave voor het beleid is om ervoor te zorgen dat duinen, dijken en keringen bestand zijn tegen deze door klimaatverandering bepaalde opgave. Verder is de ecologische opgave gericht op de vraag of wettelijke normen op het gebied van natuur en ecologie in de toekomst en met klimaatverandering gehaald worden (vanuit Kaderrichtlijn Water). Voor het natuurbeleid spelen internationale verplichtingen een centrale rol (vanuit Natura 2000). Daarnaast richt deze opgave zich op het ecosysteem als geheel en vragen als: Hoe divers zijn ecosystemen? Hoe sterk is de onderlinge verbinding? Hoe uniek is een gebied op de schaal van de regio, het land of zelfs internationaal?

Natura 2000

De dynamische processen (zoals getij, stroming, erosie/sedimentatie) in de delta zorgen voor een grote variatie in habitats (slikken, schorren en zilte graslanden, zandbanken, duinen etc.). Deze gebieden (voornamelijk beperkt tot de Ooster- en Westerschelde en de kustzone) vormen broed- en foerageergebied voor veel verschillende soorten (trek)vogels. De ondiepe, voedselrijke wateren vervullen een belangrijke rol als kraamkamer voor vissen in de delta, Voordelta en Noordzee. Ook de afgesloten wateren hebben karakteristieke natuurwaarden. Zo is het Grevelingenmeer een helder zeldzaam zoutwatermeer en van belang o.a. als foerageer en overwintergebied voor vogels. Ook de zoete bekkens kennen verschillende waardevolle habitats zoals rietlanden, ruigten en gorzen, van belang voor vele vis- en vogelsoorten. Vanwege haar zowel nationale- als internationale belang voor de trekvogels, broedvogels, vissen en zeehonden zijn grote buitendijkse delen van de Zuidwestelijke Delta aangewezen als Natura 2000 gebied om deze natuurwaarden te beschermen: Oosterschelde, Hollandsch Diep, Haringvliet, Oude Maas, Grevelingen, Krammer-Volkerak, Zoommeer, Veerse Meer en Westerschelde & Saeftinghe. Natura 2000 is een netwerk van beschermde gebieden in Europa die vallen onder de Vogel- en Habitatrichtlijn. Naast Natura 2000 is natuurbescherming op nationaal niveau vastgelegd in de Natuurbeschermingswet (1998). Voor elk Natura 2000-gebied gelden instandhoudingsdoelen. Die geven aan welke natuurlijke leefgebieden en populaties van dier- of plantensoorten in dit gebied behouden, hersteld of ontwikkeld moeten worden. De mariene getijdensystemen in de Zuidwestelijke Delta die onder de Vogel- en Habitatrichtlijn zijn Oosterschelde, Westerschelde & Saeftinghe en de Voordelta. Tabel 1 beschrijft de habitattypen in deze gebieden en bijbehorende doelstellingen.

Tabel 1: Habitattypen en instandhoudingsdoelstellingen voor de getijdengebieden Oosterschelde (OS), Westerschelde & Saeftinghe (WS) en de Voordelta (VD) (Directie Regionale Zaken 2008; Programmadiirectie Natura 2000 2009a; Programmadiirectie Natura 2000 2009b)

Habitattypen	Ooster-schelde	Wester-schelde & Saeftinghe	Voordelta	Instandhoudingsdoelstelling
H1110 Permanent overstroomde zandbanken		X	X	WS:1, VD:1
H1130 Estuaria		X		WS:3
H1140 Slik- en zandplaten			X	VD:1

H1160 Grote baaien	X			OS:3
H1310 Zilte pionierbegroeiingen	X		X	OS:2, VD:1
H1320 Slijkgrasvelden	X	X	X	OS:1, WS:1
H1330 Schorren en zilte graslanden	X	X	X	OS/VD:1, WS:3
H7140 Overgangs- en trilvenen	X			OS:3
H2110 Embryonale duinen		X	X	WS/VD:1
H2120 Witte duinen		X		WS:1
H2160 Duindoornstruwelen		X		WS:1
H2190 Vochtige duinvalleien		X		WS:1

1=Behoud oppervlakte & kwaliteit

2=Uitbreiding oppervlakte & behoud kwaliteit

3=Uitbreiding oppervlakte & verbetering kwaliteit

Kaderrichtlijn Water en Kaderrichtlijn Mariene strategie

De Kaderrichtlijn Water (KRW) is een Europese richtlijn die voorschrijft dat de waterkwaliteit van de Europese wateren vanaf 2015 aan bepaalde eisen moet voldoen. Daarbij is het van belang dat niet alleen de chemische waterkwaliteit (in relatie tot verontreinigingen, voedingsstoffen) maar ook de biologische waterkwaliteit (gezonde flora & fauna) op orde is. De KRW heeft betrekking op alle bekkens in de delta. Daarnaast is sinds juli 2008 de Kaderrichtlijn Mariene strategie (KRM) van kracht. Deze richtlijn richt zich specifiek op de bescherming van het mariene milieu van nu tot 2020 en deze richtlijn is van kracht voor de Voordelta. Onderdeel hiervan is een netwerk van beschermde gebieden op zee. Voor deze beide richtlijnen moeten beheersplannen worden opgesteld die de aanpak en maatregelen beschrijven om de doelstellingen te behalen. Vaak worden verbetermaatregelen in het kader van KRM en KRW samen opgepakt met de verwezenlijking van de Natura 2000 doelstellingen.

3 Analyse conventionele keringen

Conventionele keringen zijn dijken en andere harde oplossingen zoals dammen, kribben en kades. In de Zuidwestelijke Delta zijn de dijken voor het overgrote deel verantwoordelijk voor de verdediging van de kust, daarom zetten we in dit rapport vooral de dijken af tegen de mogelijke alternatieven die er zijn. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op voor- en nadelen van dijken als kustverdediging.

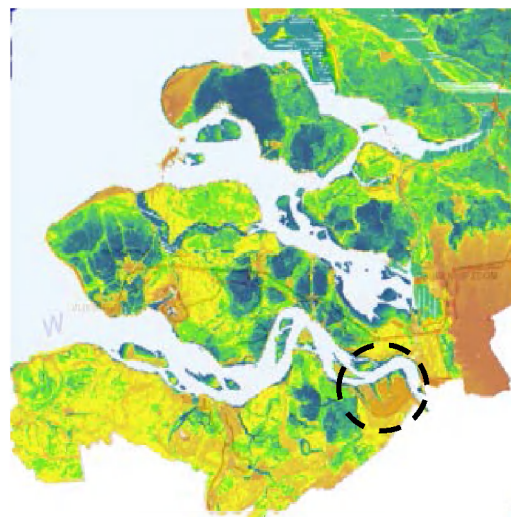
3.1 Voordelen van dijken

Dijken hebben door de eeuwen heen, alhoewel in sommige perioden met wisselend succes, een belangrijke rol gespeeld in het uitbreiden van het land en het beschermen van het land tegen de zee en bescherming tegen overstromingen. De dijken gaven het vertrouwen en de zekerheid waardoor de delta tot bloei kon komen en dorpen, steden, infrastructuur, landbouw, havens en industrie konden ontwikkelen. Dijken worden gemaakt van gebiedseigen materiaal dat over land of water kan worden aangevoerd. Daarnaast kunnen ze worden aangepast (opgehoogd of verstevigd) indien nodig, gaan ze soms wel eeuwenlang mee en vormen ze vaak een relatief goedkope oplossing voor laaggelegen kustgebieden met een lage grondprijs (Brampton 2002).

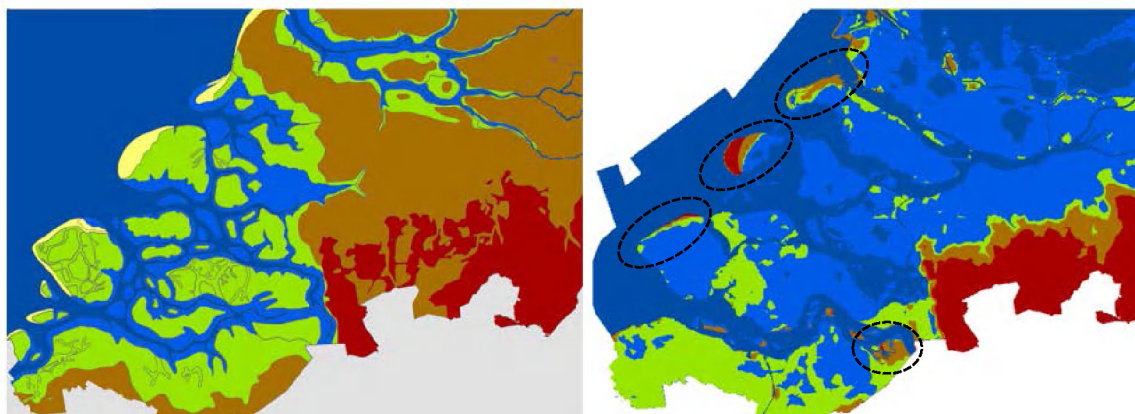
Na de watersnoodramp in 1953 bleek opnieuw de kwetsbaarheid van het land en haar bewoners als de dijken het eenmaal begaven. Met de uitvoering van de Deltawerken werd de controle over de bescherming van het land opnieuw herwonnen. De Zuidwestelijke Delta is nu zodanig beschermd dat de kans op een overstroming in de delta 1/4000 jaar is, in het rivierengebied is dit 1/2000 of 1/1250 jaar en voor de Randstad 1/10000 jaar. De Deltawerken zorgden voor een verkorting van de totale lengte aan zeewerende dijken naar 80 km. Hiermee heeft 700 km aan dijken de primaire waterkerende functie verloren waardoor een lagere dijkhoogte toelaatbaar is. Dit scheelt aanzienlijk in de kosten voor dijkverzwaringen en beheer en onderhoud.

3.2 Nadelen van dijken

Naast de veiligheid en het vertrouwen die de dijken ons bieden hebben ze ook schaduwkanten. Dijken zijn statisch en kunnen niet gemakkelijk aangepast worden op veranderende omstandigheden zoals zeespiegelstijging, bodemdaling en extremere stormen als gevolg van klimaatverandering. Deze ontwikkelingen vragen om herhaaldelijk ophogen en verbreden van dijken om het vereiste veiligheidsniveau te handhaven. De verbredingen hebben vaak verlies van intergetijden habitat tot gevolg. Naast dat dit zeer kostbaar is lijkt het geen duurzame oplossing om de dijken steeds hoger te maken terwijl het land steeds verder inklinkt. Hoe hoger het verschil tussen land en zee, hoe hoger de impact zal zijn bij een overstroming als gevolg van een dijkdoorbraak. Bovendien zorgt het groter wordende verhang voor een toename aan zoute kwel binnendijks. Dit is nadelig voor de landbouw. Een ander aspect is dat delta's zich kenmerken doordat zij zich gaandeweg in zee uitbreiden en ophogen door de aanvoer van zand en klei vanuit de zee en de rivier. Door de dijken kan het achterliggende land niet meegroeien met de zeespiegelstijging. Figuur 4 laat zien dat juist vandaag de hoogst gelegen delen in de Zuidwestelijke Delta de jongste polders zijn (groene en gele delen) of buitendijks (bijv. Verdrongen Land van Saefthinge) liggen. Figuur 5 illustreert



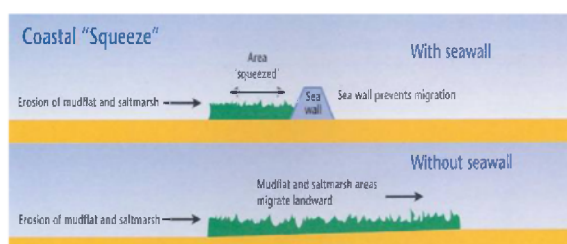
Figuur 4, hogtekaart Zuidwestelijke Delta. Het Verdrongen land van Saefthinge (omcirkeld) is een van de hoogst gelegen delen van de delta.



een schatting van hoe het gesteld zou zijn met de hoogteligging van de delta als er geen dijken waren geweest. Grote delen van de delta waren dan geleidelijk opgehoogd.

Figuur 5, links: de hoogteligging Zuidwestelijke Delta als er geen dijken waren geweest. Rechts: de hoogteligging van de Zuidwestelijke Delta in de huidige situatie met dammen en deltawerken (blauw is beneden zeeniveau). De cirkels geven de hoger gelegen delen aan: Land van Saeftinghe en de koppen van de eilanden (bron: Provincie Zeeland).

Naast opslibbing is er een andere ontwikkeling die wordt belemmerd door de dijken. Als gevolg van zeespiegelstijging verplaatst buitendijkse schorvegetatie zich naar hoger gelegen delen. In een natuurlijke situatie zou de vegetatie zich landwaarts op hoger gelegen delen ontwikkelen. Door de aanwezigheid van de dijken is dit niet mogelijk waardoor schorren als het ware dreigen te verdrinken met de stijgende zeespiegel. Dit proces wordt "coastal squeeze" genoemd (Figuur 6). Naast de rol van schorren in het beperken van de golfaanval en erosie vervullen ze ook andere waardevolle functies zoals onder andere het zuiveren van water, ondersteunen van de vispopulatie voor de visserij, opname van CO₂ en dragen ze bij aan een aantrekkelijk landschap voor recreanten en toeristen (Barbier, Hacker et al. 2011). Slikken en schorren vormen een cruciaal habitat van het estuariene ecosysteem als foerageer- en broedgebied voor kustvogels en als leefgebied voor vele soorten vissen, macrobenthos en algen.



Figuur 6, het principe van "coastal squeeze" waarbij schorren beklemd raken tussen de stijgende zee en de dijken (Environment Agency 1998).

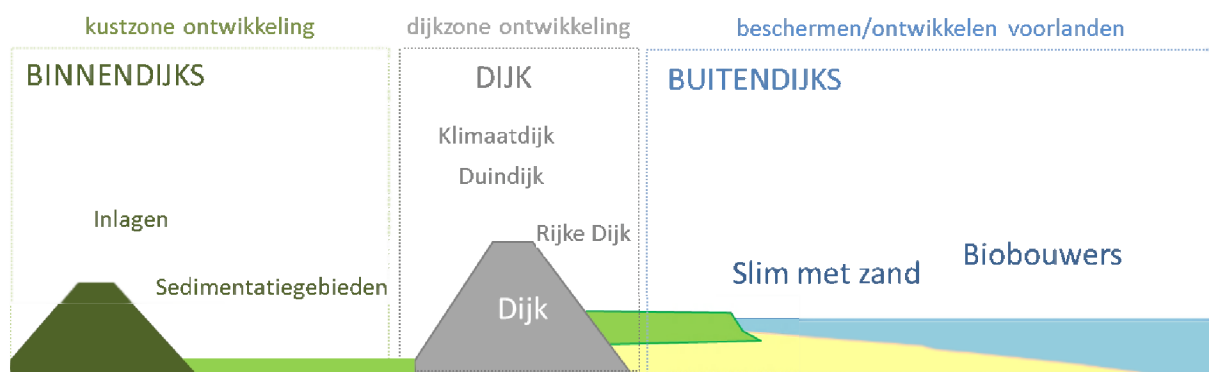
Tot slot is verbetering, beheer en onderhoud van dijken een zeer kostbare aangelegenheid. Vellinga et al. (2009) beschrijft dat in 2006 van 46% van de dijken in Nederland het onzeker was of ze voldeden aan de wettelijke veiligheidsnorm. Mogelijke oorzaak is dat er onvoldoende geld beschikbaar was voor dijkverbetering. Onafhankelijk onderzoek in 2007 heeft uitgewezen dat er een tekort is van ongeveer 1 miljard euro voor het verkrijgen van de wettelijke veiligheidsnorm voor de dijken in Nederland (Adviescommissie Financiering Primaire Waterkeringen 2006). Vanuit financieel oogpunt is het verkennen van andere, meer goedkopere vormen van kustverdediging daarom wenselijk.

4 Definiëren alternatieve waterkeringen

Dit hoofdstuk beschrijft nieuwe typen (of aanpassingen aan) keringen die veiligheid bieden tegen overstromingen maar ook gericht zijn op meer ruimte voor natuurlijke processen. In het vervolg wordt hiernaar verwezen als "alternatieve waterkeringen". Daar waar dijken natuurlijke groei van schorren belemmeren, een harde grens vormen tussen land en zee en weinig ruimte bieden voor flora en fauna, zijn alternatieve keringen er juist op gericht om (een of meer van) deze nadelen het hoofd te bieden. Alternatieve keringen zijn ontworpen om systeem potenties te maximaliseren, bijvoorbeeld door de juiste randvoorwaarden te creëren voor schorontwikkeling, of sedimentatie van zand en slib, of het bieden van een vestigingsplaats voor schelpdieren om een rif te vormen die erosie tegen gaat. Zoals dijken en de Deltawerken technische oplossingen zijn die de zee zoveel mogelijk buitenhouden wordt voor alternatieve waterkeringen technische- en ecologische kennis gecombineerd om natuurlijke processen te faciliteren en te benutten. De alternatieve waterkeringen die hier behandeld worden zijn voornamelijk gericht op getijdensystemen maar mogelijk ook toepasbaar in andere wateren.

De mogelijkheden voor typen alternatieve waterkeringen hangen nauw samen met lokale omstandigheden. Zo zijn er maatregelen die getroffen kunnen worden ter bescherming van voorlanden buitendijks, aanpassingen aan de dijk zelf of daar waar het toelaatbaar is een verbreding van de kustzone in binnendijkse richting. De alternatieve waterkeringen die besproken worden zijn daarom als volgt ingedeeld en worden volgens deze volgorde besproken (Figuur 7)

- **Buitendijkse mogelijkheden:** beschermen en bevorderen van voorlanden
- **Dijk zelf:** aanpassingen aan bestaande dijken of aanleg nieuwe dijken
- **Binnendijkse mogelijkheden:** gebiedsontwikkeling binnendijks

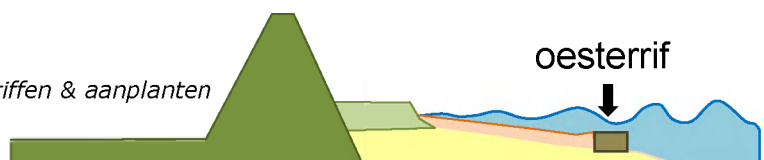


Figuur 7, een overzicht van verschillende typen alternatieve waterkeringen. In plaats van een harde grens tussen land en zee, gevormd door de dijk, bestrijken de alternatieve waterkeringen een veel bredere zone, met als doel een meer geleidelijke transitie tussen land en zee, waarbinnen natuurlijke processen een belangrijke rol kunnen spelen.

4.1 Buitendijkse mogelijkheden

Voorlanden kunnen bestaan uit slikken en schorren en komen de veiligheid van de kustzone ten goede door hun golf dempende werking (Gedan, Kirwan et al. 2011). In het algemeen kan worden gesteld: hoe breder het voorland, hoe beter. Daarnaast herbergen ze als intergetijdengebieden belangrijke natuurwaarden. Maar deze gebieden zijn juist ook kwetsbaar en gevoelig voor erosie door golven en stroming, processen die nog sterker op zullen treden als gevolg van zeespiegelstijging. Hieronder worden verschillende methoden besproken die bijdragen aan het herstel- en/of uitbreiding van deze voorlanden.

4.1.1 Inzet "biobouwers": schelpdierreiffen & aanplanten duinen en schorren



Biobouwers (ook wel "ecosystem engineers" genoemd) zijn planten en dieren die een sterke invloed uitoefenen op hun omgeving. Zo zijn de vegetatie op de schorren en het helmgras in de duinen verantwoordelijk voor de opbouw van een groot deel van Nederland. Daarnaast kun je de natuur ook een handje helpen door de juiste omstandigheden te creëren. De laatste jaren heeft de interesse in inzet van deze biobouwers in kustverdediging een vlucht genomen: ten eerste is er behoefte aan duurzame, kosteneffectieve methoden in het licht van klimaatverandering en zeespiegelstijging en ten tweede is er ook behoefte aan methoden van kustverdediging die een geringe impact hebben op het ecosysteem en misschien zelfs wel kansen bieden om ecologische processen te bevorderen (Day, Psuty et al. 2000). Door inzet van biobouwers worden mogelijkheden verkend om bescherming van de kust te realiseren met behulp van ecologische functies. Biobouwers kunnen worden ingezet om slikken en schorren te beschermen tegen verdere erosie, en zo een breed voorland te behouden en de golfaanval te minimaliseren. Voorwaarden bestaan uit een combinatie van omgevingsvariabelen die het vestigen en groeien van de betreffende biobouwer (bijv. Japanse oester) mogelijk maken. Schorrenplanten zijn uiteraard ook geschikte biobouwers en waar mogelijk kan ook gedacht worden aan het (her)creëren van schorren.

Volgens De Vries et al. (2007) zijn oester- en mosselriffen een veelbelovende methode om voorlanden voor de dijken te stabiliseren doordat ze hydrodynamische energie (zoals golven, stroming) van het water reduceren en sedimentatie bevorderen. Deze schelpdierreiffen kunnen daarbij de rol van kribben en dammetjes overnemen. Daarnaast hebben de riffen ook invloed op de lokale ecologie door het creëren van beschutting, luwte en meer sedimentatie (Piazza, Banks et al. 2005), en bevorderen de riffen de biodiversiteit als habitat voor vissen en crustacea soorten (Borsje, Van Wesenbeeck et al. 2011; Scyphers, Powers et al. 2011). In het geval dat riffen droogvallen kunnen ze een foerageer habitat leveren voor vogels. Een studie van Van Sluis & Ysebaert (2012(in perparation)) beschrijft de mogelijkheden van de rol van aquacultuur in kustverdediging. Zo zijn er meerdere vormen van aquacultuur die bijvoorbeeld golfenergie kunnen dempen zoals oestertafels en kweek van mosselen op palen ("Bouchot") (Van Sluis and Ysebaert 2012(in perparation)).

➤ Voorbeeld: Pilot oesterriffen Oosterschelde – *Building with Nature*

In de Oosterschelde is een grootschalige proef in uitvoering waar wordt onderzocht of aangelegde oesterriffen de erosie van het intergetijdengebied kan tegengaan of zelfs plaataangroei kan stimuleren. Naast golfbreking ligt de focus op de invloed van de riffen op plaatrand stabilisatie omdat de platen en slikken in de Oosterschelde als gevolg van de zandhonger steeds lager worden door erosie. Deze proef wordt uitgevoerd in het kader van het innovatieprogramma *Building with Nature* en wordt uitgevoerd door samenwerkende partijen IMARES Wageningen UR, Rijkswaterstaat, NIOZ (voorheen NIOO-CEME), TUD en Deltares.

De pilot met oesterriffen is verdeeld over twee locaties in de Oosterschelde ten zuiden van Schouwen-Duiveland: bij locatie De Val is één rif aangelegd vanaf de dijk, op de slikken van Viane zijn twee riffen aangelegd op het slik nabij de laagwaterlijn (Figuur 8). Ter plaatse zijn schanskorven van kippengaas met een totale lengte van 200 meter en 10 meter breedte gevuld met oesterschelpen. De korven zijn ca 25 cm hoog. Onderzocht wordt of (1) deze structuren erosie van het slik afremmen en (2) of oester- en mossellarven zich op deze kunstriffen vestigen zodat het zichzelf in stand kan houden en kan uitgroeien tot een levend rif.



Figuur 8, a. locatie van de pilot riffen in de Oosterschelde b. het oesterrif bij Viane, c. het oesterrif bij de Val nabij Zierikzee met laag water.

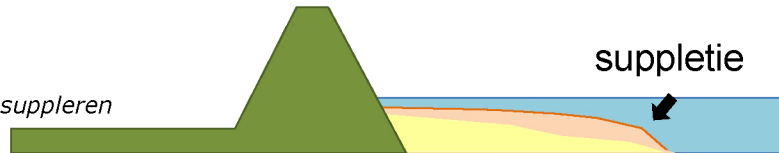
Het bevorderen van de vorming van duinen en schorren kan op grote schaal bijdragen aan de verdediging van de kust. Duinen ontstaan door verstuiwing van zand en ontwikkelen zich verder als ze begroeid raken met vegetatie. Ze vormen een belangrijke barrière tegen de zee langs het overgrote deel van de Hollandse kust maar ook de koppen van de eilanden in de wadden en de delta. De mens heeft duinvorming bevordert door helmgras aan te planten als biobouwer (Figuur 9) en rijsthouten dammen te plaatsen die verstuiwingen tegengaan en het zand vasthouden. Naast deze methode worden duinen, stranden en vooroevers opgespoten met zand om de kustlijn te behouden en wordt gezocht naar meer natuurlijke manieren van suppletie. Dit wordt besproken in de volgende paragraaf.



Figuur 9, aanplant van helmgras (www.ecomare.nl)

Naast duinen hebben slikken en schorren (voorlanden) voor de kust ook een belangrijke rol gespeeld in de opbouw van ons land en versterking van de kust. Voornamelijk schorren spelen een belangrijke rol in het reduceren van de golfaanval op de dijken. Möller *et al.* (2001) heeft op basis van veldmetingen bepaald dat golfreductie boven een schor 50% hoger is dan boven een zandvlakte met gelijke diepte. Het aanplanten van Engels slijkgras (*Spartina anglica*) is in het verleden gebruikt om schorvorming en opslibbing te bevorderen. In 1924 werden stukken wortelstokken voor het eerst in Nederland ingevoerd en in 1926 op de Zeeuwse slikken aangeplant. Doordat deze pioniersplant op een veel lager niveau kan groeien dan de inheemse soorten is door de introductie en aanplant van Engels slijkgras de schorgroei met name in de Westerschelde sterk bevorderd (Kornman and Schouwenaar 2001).

4.1.2 Slim met zand: strategisch suppleren



Ieder jaar suppleert Rijkswaterstaat gemiddeld 12 miljoen m³ zand op stranden en vooroevers langs de Nederlandse kust (Ronde 2008; Baptist 2011). Ongeveer 2-3 miljoen m³ wordt in de delta gesuppleerd, met name op de Kop van Schouwen en Walcheren en langs de westkust van Zeeuws-Vlaanderen. Deze periodieke suppleties zijn een kostbare aangelegenheid.

Slim omgaan met zand heeft betrekking op het strategisch suppleren van zand zodanig dat de dynamiek van getij, stroming, golven en wind benut kan worden voor transport van het zand om het kustfundament te verstevigen. Dit wordt ook wel "soft engineering" genoemd. Het voordeel hiervan is dat er geen sprake is van een rigide kering maar een flexibele maatregel. Naast veiligheid kunnen suppleties ook een ecologische meerwaarde opleveren, alhoewel op de plaats van de suppletie het bodemleven tijdelijk zal sterven en enkele jaren nodig heeft om te herstellen. Ook zijn er combinaties mogelijk voor gebruik van biobouwers (bijvoorbeeld schelpdierriffen) om een suppletie langer te kunnen behouden (zie paragraaf Inzet Biobouwers). Kennisontwikkeling op dit gebied staat nog in de kinderschoenen. Binnen het innovatieprogramma *Building with Nature* worden verschillende onderzoeken uitgevoerd om deze effecten beter te begrijpen en te bekijken hoe natuurlijke processen kunnen worden aangewend om de kust te versterken en tegelijkertijd een ecologische meerwaarde kunnen creëren.

➤ Voorbeeld: Pilot Zandmotor

De Zandmotor (Figuur 10) is een suppletieproef die uitgevoerd wordt tussen Ter Heijde en Kijkduin. Tussen maart 2011 en november 2011 hebben Rijkswaterstaat en de provincie Zuid Holland het schiereiland van 21,5 miljoen m³ zand in de vorm van een haak opgespoten. De komende jaren wordt onderzocht of het in één keer suppleren van een grote hoeveelheid zand de jaarlijkse zandsuppleties langs de Hollandse kust kan beperken of zelfs vervangen. Ook wordt onderzocht of dit de impact op het leven in de bodem (dat na elke suppletie moet herontwikkelen) kan beperken en wat kansen zijn voor ecologie.



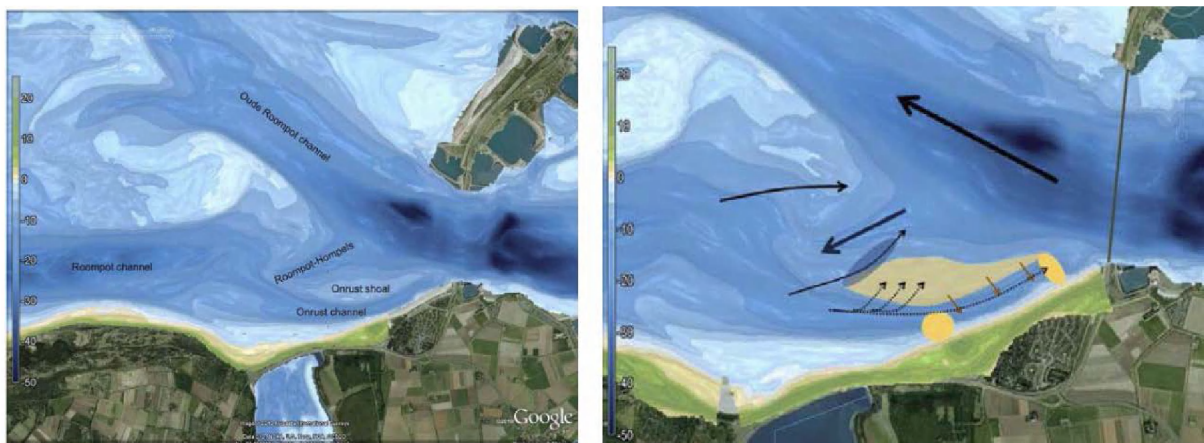
Figuur 10, de zandmotor (www.zandmotor.nl)

Toepassing in de delta: De schaal waarop de proef met de Zandmotor wordt uitgevoerd langs de Hollandse kust is waarschijnlijk niet geschikt voor de Zuidwestelijke Delta. De gebieden die gesuppleerd worden zijn kleiner en gelegen op de koppen van de eilanden, waardoor bij verspreiding van het zand noordwaarts het zand niet langs de kust neerslaat en verloren zal gaan. Op kleinere schaal is toepassing van dit principe wellicht wel interessant.

➤ Voorbeeld: Zandloper

Fiselier et al. (2011) heeft een verkenning uitgevoerd in het kader van *Building with Nature* in opdracht van het Deltaprogramma, naar de bijdrage van natuurlijke oplossingen aan de veiligheid. Deze studie beschrijft onder andere het concept van de "zandloper". Op verschillende plekken langs de kust speelt het probleem van kustwaarts bewegende geulen waardoor het kustfundament geleidelijk erodeert. Tot op heden wordt dit proces bestreden met regelmatig suppleren van zand. Binnen het *Building with*

Nature programma is het concept van de "zandloper" bedacht ondersteunt door modelberekeningen van Deltares. Dit concept houdt in dat men de getijdengeul langs de kust gedeeltelijk dempt. De waterbeweging zal er dan voor zorgen dat het gesuppleerde zand richting de kust zal gaan bewegen en de vooroever versterkt. De gedeeltelijke demping van de geul kan gecompenseerd worden door een verbreding van de geul aan de zeezijde. De essentie van deze oplossing is te zorgen dat de geul ondieper wordt en de zandbank de geul niet meer tegen de kust aandrukt. Fiselier *et al* (2011) noemt het voorbeeld van de oprukkende erosie die speelt bij de Banjaard op Noord-Beveland. Hier wordt een ontwerp voorgesteld waar door circa 1 miljoen m³ zand aan te brengen in de geul langs de kust, "Onrust geul" (Figuur 11) de geul gedeeltelijk afgeknepen wordt. De stroming verplaatst zich daardoor naar het noorden waardoor de zandplaat richting de kust zal gaan "lopen" en het kustfundament zal versterken.



Figuur 11, het concept van de "zandloper", ontwerp voor de Banjaard: door het plaatselijk dempen van de Onrust geul wordt de stroming uitgeschakeld en zorg golfgedreven transport ervoor dat de zandbank richting de kust gaat bewegen (Fiselier, Jaarsma *et al.* 2011).

➤ Voorbeeld: Suppletie Galgeplaat, Schelpenhoek en Oesterdam

De platen in de Oosterschelde eroderen als gevolg van een zandtekort in de geulen (zandhonger). In verschillende onderzoekstrajecten worden toepassing van suppleties onderzocht (zie ook kansenskaart figuur 21):

Suppletie Galgenplaat: Rijkswaterstaat in 2008 een pilot opgestart waarbij 130.000m³ zand is aangebracht op de Galgeplaat (Figuur 12a). Door deze suppletie wordt het gebied terug opgehoogd en moet het op termijn terug geschikt foerageergebied voor vogels worden. Building with Nature onderzoekt i.s.m. Rijkswaterstaat hoe snel een nieuwe bodemdier levensgemeenschap zich herstelt en ontwikkelt op de suppletie. Deze kennis moet bijdragen aan een lange termijn strategie voor het behoud van het intergetijdengebied in de Oosterschelde.

Suppletie Schelpenhoek: Bij deze proef, uitgevoerd door Rijkswaterstaat en begeleidt door Witteveen en Bos, zijn twee typen suppleties uitgevoerd bij de Schelpenhoek (Figuur 12b). Bij de ene suppletie worden stortstenen dammetjes aangelegd waarbij er terrassen zijn gevormd en een traditionele suppletie zonder versterking. Doel van de proef is te kijken welke methode kosten efficiënter is.

Veiligheidsbuffer Oesterdam: Onder leiding van Rijkswaterstaat wordt ook bij de Oesterdam een suppletie uitgevoerd (Figuur 12c). Door 600.000 m³ zand te suppleren wordt een zandbron aangebracht die zich kan verspreiden over de platen en langs de dijk. De golfbelasting op de dijk neemt daarmee af. Hierdoor kan het ophogen van de dijk met 25-30 jaar worden uitgesteld en tegelijkertijd stopt de suppletie de geleidelijke afkalving van de platen en helpt het een waardevol habitat te herstellen. Ook wordt onderzocht hoe verschillende structuren (zoals oesterriffen) kunnen worden gebruikt om de suppletie langer te behouden en of deze benut kunnen worden voor aquacultuur. De praktijkproef gebeurt lokaal over een lengte van circa 2 kilometer en gaat in 2012 van start.

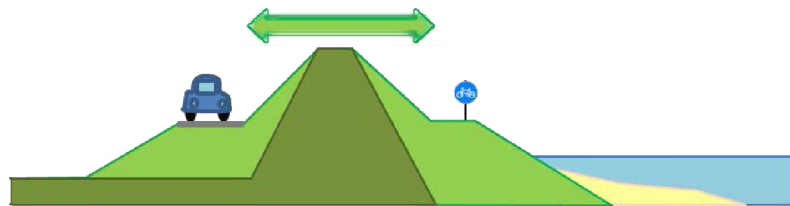


Figuur 12, a. suppletie Galgenplaat in uitvoering. b. Proef bij de Schelpenhoek waarbij het effect van drempels op het behoud van een suppletie wordt onderzocht (Tauw 2008) c. suppletie Oesterdam

4.2 Aanpassing dijken

Waar binnen- en buitendijkse alternatieve methoden voor kustverdediging niet mogelijk zijn, bijvoorbeeld omdat de voorwaarden ontbreken of omdat er geen economisch of maatschappelijk draagvlak is, kunnen de dijken worden gehandhaafd. Deze paragraaf beschrijft nieuwe concepten om een dijk veiliger en/of ecologisch interessanter te maken en/of de kansen voor mede gebruik te vergroten zonder dat deze opgehoogd hoeft te worden.

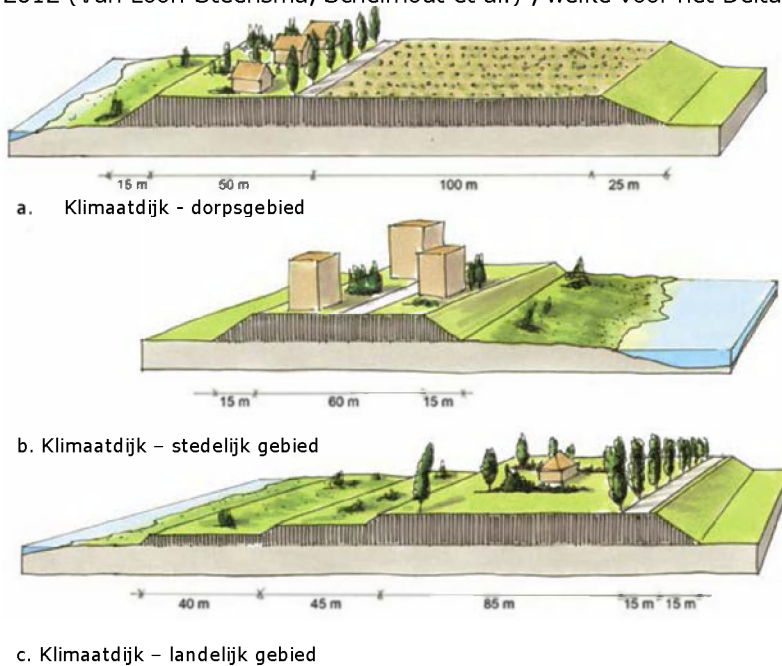
4.2.1 Klimaatdijk



Klimaatdijk (ook wel "Deltadijk") is een nieuw type overgedimensioneerde dijk die zo breed is dat een plotselinge, onbeheersbare doorbraak vrijwel uitgesloten is. Binnen het onderzoeksprogramma Kennis voor Klimaat is een verkenning uitgevoerd met als doel om de ideeën, kennis en ervaringen rondom dit nieuwe type dijk te bundelen. Een klimaatdijk wordt hierbij gedefinieerd als: "een verzamelterm van inrichtingsvormen waarbij de waterkering zo robuust is dat deze niet doorbreekt en dus blijvende veiligheid biedt" (Hartog, Van Loon-Steensma et al. 2009). Bij extreem hoge waterstanden bezwijkt de klimaatdijk niet maar stroomt er alleen water overheen waardoor de schade veel geringer is als een reguliere dijk die doorbreekt (Vellinga 2008).

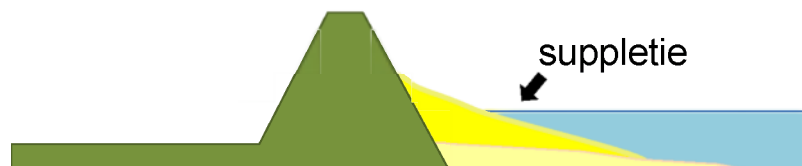
Naast veiligheid is een ander aspect van klimaatdijken dat door de robuuste dimensionering en de lange levensduur deze geschikt voor uiteenlopende vormen van gebruik zoals alternatieve woonvormen, recreatie, beweiding en landschap. Dit nieuwe type dijk zorgt zo voor een geleidelijke overgang van land naar zee als een "waterkerend landschap" ingebed in de omgeving. Klimaatdijken kunnen een uitkomst bieden daar waar voorlanden afwezig zijn en de golfaanval groot is. Door het brede ontwerp is echter wel veel meer ruimte nodig dan bij een reguliere dijk (Van Loon-Steensma, Schelfhout et al. 2012), maar door het flauwe en brede talud ontstaan ook weer mogelijkheden voor gebruik. De verkenning Combikering Den Helder (Rijkswaterstaat 2004) geeft voorbeelden van integratie van een dijk in stedelijk gebied. Een klimaatdijk kan door zijn brede basis ook bijdragen aan het verminderen van binnendijkse kwel zoals wordt verkend door de gemeente Tiel langs de Waal (2009). Hoewel een klimaatdijk ruimte biedt voor ontwikkeling, gaat er ook ruimte verloren waarbij binnendijks landgebruik moet veranderen of buitendijks intergetijdengebied verloren gaat. Een mogelijkheid is om de klimaatdijk zodanig uit te voeren, bijvoorbeeld met een zeer flauw aflopende vooroever en afstemming met gebruik, dat er mogelijkheden voor het ontwikkelen van slikken en schorren ontstaan.

Het ontwerp van een klimaatdijk kan uiteenlopen en vereist locatie specifiek maatwerk. Zo zijn hele brede vormen moeilijk toepasbaar in een dichtbevolkt gebied. In een studie van het WNF (Van Winden, Tangelder et al. 2010) naar een mogelijke lange termijn inrichting van het Haringvliet zijn drie verschillende concepten van mogelijke klimaatdijken uitgewerkt voor toepassing in verschillende gebieden (Figuur 13). Naast dit voorbeeld zijn er velerlei concepten en ideeën in ontwikkeling zoals de "terpendijk". Voor een meer volledig overzicht zie rapportage Innovatieve dijken in het Waddengebied 2012 (Van Loon-Steensma, Schelfhout et al.) , welke voor het Deltaprogramma Wadden is opgesteld.



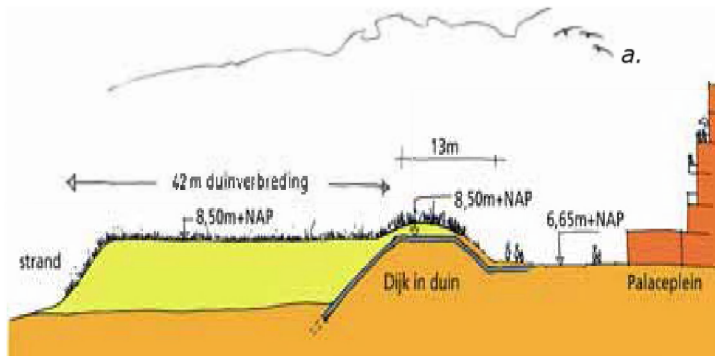
Figuur 13, drie verschillende types klimaatdijken voor toepassing in gebieden met beperkte of een minder beperkte ruimtevaag (Van Winden, Tangelder et al. 2010) zoals gebruikt in deze studie.

4.2.2 Duindijk



Een Duindijk is een dijk ingebed in een duin die voor de dijk komt te liggen. De duin wordt gesuppleerd op strand of vooroever tot op dijkniveau waardoor een breed glooiende zandvlakte ontstaat die zorgt voor een geleidelijke overgang tussen land en zee. De duin zorgt voor een stevige buffer tegen het water waardoor de golf aanval wordt beperkt en de dijk niet opgehoogd hoeft te worden. De duin en flauwe vooroever bieden tevens mogelijkheden voor natuur, recreatie en nieuwe vormen van gebruik zoals aquacultuur.

Het concept Duindijk wordt in uiteenlopende vormen toegepast zoals een suppletie tegen de dijk als versteviging van een zwakke plek bij Noordwijk (Figuur 14a), maar ook door vooroeversuppletie zoals bij de Oesterdam (zie volgende alinea) waarbij zandtransport door wind- en waterbeweging plaatsvindt en zowel de dijk als voorlanden worden versterkt. De Veerse Gat dam is een mooi voorbeeld van een Duindijk die zich volgens een natuurlijke weg heeft ontwikkeld. Na aanleg van de dam in 1961 als onderdeel van de Deltawerken is de dijk door het samenspel van zandverstuiving en vegetatieontwikkeling geleidelijk een duin geworden (zie figuur 14b). Ook op het werkeiland Neeltje Jans zijn na aanleg van verdediging brede duinen ontstaan.



Figuur 14, a. Een voorbeeld van "Dijk in Duin" ontwikkeld door het Hoogheemraadschap van Rijnland (2007) als oplossing voor een zwakke plek in de zeewering b. De Veerse Gat dam (1961) die door transport van zand geleidelijk aan een duin is geworden.

➤ Voorbeeld: Versterking waterkering Sophiastrand

De dijk langs het Sophiastrand bij de Roompot Mariahaven op Noord-Beveland (Figuur 15) moet worden versterkt. Uit onderzoek blijkt dat een duinversterking met zand goedkoper is dan een "harde oplossing" en ook minder verstoring op het aanliggende recreatiebedrijf geeft, omdat deze buiten het toeristenseizoen kan worden uitgevoerd. Voor versterking en onderhoud is 246.000m^3 zand nodig waarbij rekening is gehouden met erosie die optreedt door zandhonger.



Figuur 15, locatie Sophiastrand, Mariahaven, Oosterschelde.

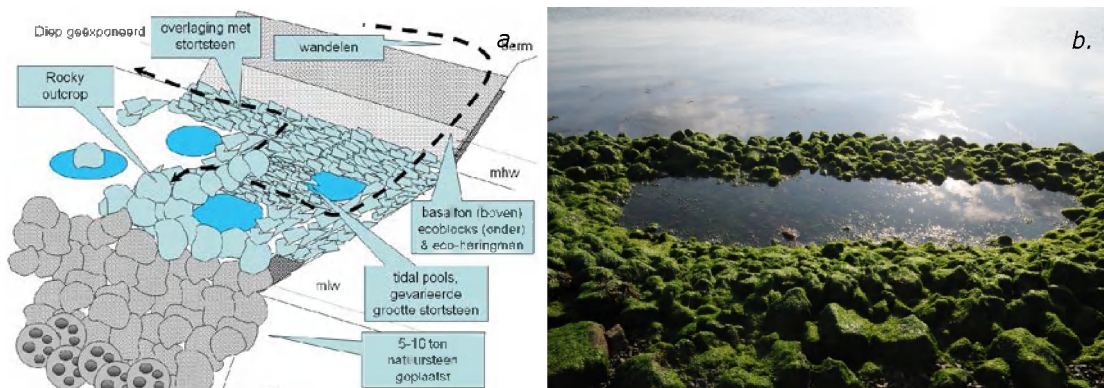
4.2.3 Rijke dijk



Nederland kent vele honderden kilometers aan dijken, dammen, kades en pieren. Deze structuren, vaak van stortsteen, vormen een potentieel leefgebied voor flora en fauna die zich vestigen op harde substraten. Deze soorten zijn waardevol omdat ze als beschutting dienen (wieren en schelpdieren) maar ook als voedsel voor vogels en vissen. Door de vooroevers heterogener te maken (richels, poeltjes, hout, steen etc.) ontstaat een optimaler vestigingsklimaat voor flora en fauna (met name algen en macrobenthos). Dit resulteert in meer individuen en een hogere diversiteit aan soorten (Borsje, Van Wesenbeeck et al. 2011). Dit is ook gunstig voor het leven in het aangrenzende watersysteem doordat er meer beschutting en voedsel is. Voorwaarde is uiteraard dat de waterkerende functie van de dijk daarbij niet vermindert.

➤ Voorbeeld: Rijke Dijken

Het project Rijke Dijken (Deltares, Rijkwaterstaat, TU Delft en Havenbedrijf Rotterdam) streeft naar een ecologische meerwaarde van de dijken door het heterogener maken van het talud. Figuur 16a laat verschillende ontwerp voorbeelden van een dijktaalud zien. In 2007 en 2008 zijn enkele proefprojecten uitgevoerd in het kader van 'Rijke Dijk' op de dijken in Yerseke (Figuur 16b) en Ellewoutsdijk, de haven van Rotterdam en op de pier van IJmuiden.



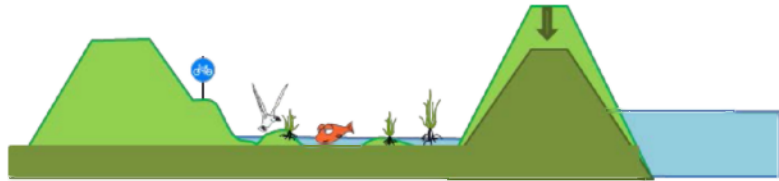
Figuur 16 a. ontwerpvoorbeeld van een Rijke Dijk (www.innoverenmetwater.nl). b. Rijke Dijk bij Koude- en Kaarspolder in Yerseke waarbij een poeltje in de vooroever is gemaakt (www.ecoshape.nl).

4.3 Binnendijkse gebiedsontwikkeling

Naast het beschermen en/of uitbreiden van de vooroever en aanpassingen aan de dijk is er ook steeds meer aandacht voor concepten, variërend van ideeën tot concrete projecten in uitvoering, die gericht zijn op het verbreden van de kustzone met binnendijkse maatregelen. De grootste drijfveer hiertoe is het ontwikkelen van een duurzaam veilige, robuuste kustverdediging, maar wordt ook toegepast als maatregel voor habitattherstel in het kader van Natura 2000.

Om bescherming te zoeken tegen een stijgende zeespiegel is het aldoor ophogen van de dijken niet de enige optie. Een brede kustzone, met een meer geleidelijke overgang tussen zee en land, biedt mogelijkheden voor duurzame veiligheid, bijvoorbeeld door de kustzone op te delen in zones met verschillende veiligheidsniveau's. Afhankelijk van hoe deze zonering wordt vormgegeven ontstaan ook kansen voor het creëren van (intergetijden)natuur en koppelingen met recreatie en aquacultuur. Door een toenemende ruimedruk met name in de kustzone is het combineren van verschillende functies steeds vaker uitgangspunt bij ruimtelijke ontwikkelingen. De vraag naar multifunctioneel medegebruik van waterkeringen komt niet alleen voort uit ruimtegebrek, maar ook omdat water een aantrekkelijke omgeving is voor bijvoorbeeld woningen, parken, waterfronten, boulevards en horeca (Ellen, Boers et al. 2011). De waterkering biedt vaak de ruimte en de mogelijkheid om de omgeving te benutten. Het ontwikkelen van de kustzone in landwaartse richting betekent echter ook dat hier functies voor moeten worden opgegeven. Dit betekent dat een afweging gemaakt moet worden of kustzone ontwikkeling geprefereerd wordt boven het huidige binnendijkse gebruik en maatschappelijke omstandigheden. Dit vergt maatwerk en een goede communicatie met landeigenaren. In deze paragraaf worden verschillende zoneringsconcepten besproken.

4.3.1 Inlaag



Een inlaag (Tekstbox 1) is een polder van historische oorsprong langs de zee waarbij een inlaagdijk als reserve) werd aangelegd wanneer risico bestond van wegzakken van de primaire waterkering. Dat de primaire dijk zou kunnen breken is tegenwoordig ontoelaatbaar, maar het principe van de inlaag met dubbele dijken als kustverdediging verdient aandacht. De primaire waterkering kan door de aanwezigheid van de secundaire dijk met een lagere kruinhoogte volstaan waarbij golfoverslag (bijvoorbeeld bij extreem hoogwater) mits aanpassing toelaatbaar is. Het overstromingsrisico in het gebied tussen de dijken (de inlaag) hoeft daarom niet eens in de paar duizend jaar, zoals 1/4000, te zijn maar kan veel lager zijn, bijvoorbeeld 1/100. Dit gebied is echter niet geschikt voor hoogwaardig landgebruik als woonzone of industrie maar kan wel benut worden als natuur- en recreatiegebied en heeft bovendien ook potentie voor kweek van zilte gewassen en aquacultuur. Hierdoor wordt een zonering van overstromingsrisico's toegepast. Bestaande inlagen zoals langs de Oosterschelde zijn bij uitstek geschikt om de veiligheidszonering toe te passen. Daarnaast zijn ook andere gebieden langs de kust waar zich dubbele dijken bevinden en waar het land minder waard is doordat het onderhevig is aan zoute kwel, geschikt om deze veiligheidszonering toe te passen.

Tekstbox 1: Inlagen van de Oosterschelde

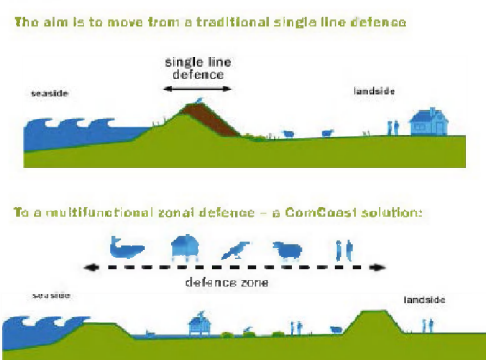


Vroeger werden inlagen ingezet als bufferzone tussen de zee en het bewoonde binnendijkse gebied. Als door de oprukkende zee een gebied niet meer veilig was om te bewonen bouwde men een tweede binnendijk die bescherming zou bieden in het geval dat de primaire kering zou breken. Vandaag de dag zijn er nog steeds dergelijke inlagen bewaard gebleven zoals aan de zuidkust van Schouwen-Duiveland en de noordkust van Noord-Beveland. Het gebied tussen de twee dijken is veelal laaggelegen en onderhevig aan zoute kwel en daardoor onaantrekkelijk voor de landbouw. Bestaande inlagen vervullen veelal een natuurfunctie en vormen een foerageergebied voor vogels. Door het historische karakter van de inlagen, hebben ze tevens een hoge cultuurhistorische waarde.

Inlaag bij Noord-Beveland (www.kustfoto.nl)

Aspecten inlaag:

- Primaire dijk hoeft minder hoog te zijn als in de huidige situatie waarbij de dijk dezelfde veiligheidsnorm heeft als dijken waar geen inlagen achter liggen.
- De zone tussen de dijken kan worden benut voor natuur, recreatie en aquacultuur.
- Koppelkansen Natura 2000 en Ecologische Hoofdstructuur
- Mogelijkheden voor vermindering zoute kwel voor de landbouw in het binnengebied (achter de secundaire dijk)
- Dijkbekleding van de primaire dijk moet bestendig zijn tegen overlopen. Dit vereist aanpassingen voornamelijk aan het binnendijkse talud van de dijk.



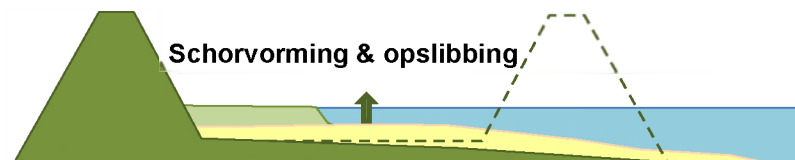
Figuur 17, de primaire dijk is overslag bestendig. De achtergelegen polder is omsloten door een tweede dijk en geschikt voor verschillende vormen van gebruik (www.comcoast.org).

- Voorbeeld: Kustlaboratorium
Het Kustlaboratorium (Figuur 18) is een initiatief van het Zeeuwse Landschap in samenwerking met de Zeeuwse Tong, Provincie Zeeland en gemeenten waarbij een binnendijkse proeftuin wordt ontwikkeld waarin men een combinatie van veiligheid, aquacultuur, natuur en recreatie wil onderzoeken. De te ontwikkelen locatie is gelegen aan de zuidkust van Schouwen-Duiveland bij Burghsluis waar een buiten- en binnendijk aanwezig is waardoor het gebied een overgangszone vormt tussen land en zee.



Figuur 18, een artist impression van het Kustlaboratorium (www.kustlaboratorium.nl)

4.3.2 Sedimentatiegebieden



Naast inlagen zijn er ook gebieden waar daadwerkelijk een dijkdoorbraak heeft plaatsgevonden en het gebied weer onder invloed staat van het getij. Een voorbeeld hiervan is het Sieperdaschor, gelegen op de grens met België aan de Westerschelde. Het buitendijkse gebied (ca 1km²) is ontstaan na een dijkdoorbraak tijdens een storm in 1990, is vervolgens niet meer opnieuw bedijkt, waarna zich schorvegetatie heeft ontwikkeld (Verbeek and Storm 2001; Eertman, Kornman et al. 2002). Het naastgelegen Verdrongen Land van Saeftinghe is een voorbeeld van een veel ouder door de zee teruggewonnen land, waar tijdens de Allerheiligenvloed in 1570 de dijken braken en het ca 3500ha grote gebied voor goed onder water kwam te staan. Dit zijn voorbeelden van ongecontroleerde gebeurtenissen, waarbij ongewild een overstroming plaatsvond en binnendijks gebied verloren ging. Echter gecontroleerde overstroming van binnendijks gebied waarbij de dijk wordt terug gezet is een opkomende methode voor verdediging van de kust met het oog op een grotere golfaanval en zeespiegelstijging (French 2006) als gevolg van klimaatverandering (French 2006). In het Verenigd Koninkrijk is het landinwaarts verplaatsen van dijken ("managed realignment", "managed retreat" oftewel het gecontroleerd herschikken van de kustlijn) een methode die met toenemende mate wordt

ingezet als kosteneffectieve en duurzame reactie op het verlies van mariene biodiversiteit en als kustverdediging (Garbutt 2008). Door het landinwaarts verplaatsen van de dijk bootst men de natuurlijke situatie na waarbij onder invloed van zeespiegelstijging schorren zich landwaarts bewegen (zie ook "coastal squeeze" paragraaf 3.2) om hun positie ten opzichte van de getijslag te behouden. In Nederland wordt het onderwater zetten van voormalig ingepolderd gebied ook wel "ontpoldering" genoemd. De nadruk bij deze benaming ligt op het verlies van land, in deze rapportage verwijzen we naar deze gebieden als "*sedimentatiegebieden*" omdat het hoofddoel is om de kustzone te laten meestijgen met de zeespiegel, met als doel duurzame veiligheid met ruimte voor natuurlijke processen.

Deze methode heeft meerdere voordelen. Allereerst is het een manier om de kust te versterken door een gebied onder invloed te zetten van het getij en te laten meegroeien met de zeespiegelstijging door ontwikkeling van schorren. Daarnaast wordt golfenergie gedempt en wordt de stabiliteit van de waterkering verbeterd (minder kans op "piping" waarbij het zeewater de dijk ondermijnd). Daarnaast is het een manier om nieuw estuarien habitat (slikken en schorren) te creëren. De aanwezige slikken en schorren in de Zuidwestelijke Delta staan immers onder druk door zeespiegelstijging en menselijke ingrepen (bijv. zandhonger in de Oosterschelde en verdiepingswerken in de Westerschelde). Ook draagt nieuw buitendijks intergetijdengebied bij aan een mooi landschap en schept het mogelijkheden voor recreatie en aquacultuur. Op de mogelijkheden voor gebruik van deze gebieden wordt dieper ingegaan in de volgende paragraaf. Uit de workshop (zie bijlage 1) kwam naar voren dat een bredere kustverdediging tevens bijdraagt aan het verminderen van binnendijkse kwel en het reduceren van de kans op "piping", een proces waarbij een zeedijk ondermijnd wordt door waterstromen door de bodem en instabiel wordt.

Echter zijn er ook nadelen. Hoewel de beheerskosten voor de binnendijken waarschijnlijk lager zullen zijn is zijn er aanpassingskosten om de secundaire dijk op het gewenste veiligheid niveau te krijgen. Ook is de aankoop van land kostbaar. Het onder water zetten van binnendijks gebied voor sedimentatiegebieden betekent ook verlies van (landbouw)land. Dit is een ingrijpende verandering voor landeigenaren en bewoners die afstand moeten doen van het gebied maar ook voor mensen die er bijvoorbeeld werken of recreëren. De keuze voor deze maatregel verdient dan ook zeer zorgvuldige afweging.

Ontwerpvoorwaarden en aandachtspunten

De inzet van het gecontroleerd onderwater zetten van gebieden langs de kust is nog een jong concept. Kennis en ervaring hieromtrent is dan ook nog volop in ontwikkeling. Hieronder wordt een analyse gegeven van beschikbare kennis en ervaring met sedimentatiegebieden. Tabel 2 geeft een samenvattend overzicht en beschrijft richtlijnen en randvoorwaarden voor sedimentatiegebieden.

1. Hoogteligging, ophoging en schorontwikkeling

Hoogteligging van het te ontwikkelen sedimentatiegebied is een cruciale factor voor het succes van de ontwikkeling van schorvegetatie (French 2006). De hoogteligging bepaald de inundatieduur, een laaggelegen gebied zal niet zomaar schor worden maar slik. De optimale hoogteligging voor schorontwikkeling is tussen Gemiddeld Hoog Water bij Doodtij (GHWD) en Gemiddeld Hoogwater bij Springtij (GHWS), dit correspondeert met ca. 450-500 overstromingen per jaar (Toft and Maddell 1995). Vanaf 1m beneden GHWD vindt kolonisatie van pioniervegetatie plaats (French 2008). Door de feedback tussen inundatiediepte en de concentratie van gesuspendeerd materiaal is intergetijdengebied in staat om zich aan te passen aan zeespiegelstijging als deze eenmaal begroeid is met schorvegetatie. Schorren hoger in het intergetijdengebied zijn beter in staat deze stijging bij te houden dan schorren laag in het intergetijdengebied (Kirwan and Temmerman 2009). Om deze reden moet de ontwikkeling van het sedimentatie gebied primair gericht zijn op het laten ontstaan van schorvegetatie. Daarnaast is het van

belang om luwte te creëren zodat het sediment wat met hoogwater het gebied ingespoeld kan neerslaan (uitkomst workshop, zie bijlage 1).

Geschikt zijn ingepolderde gebieden waar vóór inpolderen ook al schorren aanwezig waren omdat hier waarschijnlijk nog steeds de juiste bodemsamenstelling en bodemchemie aanwezig is en waar erosie van nature beperkt is (French 2006). Door het in een klap toelaten van het getij maakt de zee een grote sprong landwaarts in een gebied wat van nature waarschijnlijk hoger had gelegen, daarom kan morfologische aanpassing en uiteindelijke schorontwikkeling relatief lang duren (French 2006). De situatie voor inpoldering verdient daarbij ook aandacht. Bij akkerland wat omgeploegd en bemest is, is er kans dat de bodem zodanig gewijzigd is dat het langer duurt voordat schorvegetatie tot ontwikkeling komt of zelfs helemaal niet tot ontwikkeling komt. Ook kan de afbraak van (zoetwater)vegetatie na onderwater zetten leiden tot anoxische omstandigheden, voornamelijk bij snelle opslibbing, wat de ontwikkeling van schorvegetatie in de weg staat (French 2006).

De hoeveelheid sediment die vervolgens wordt ingevangen op een schor is afhankelijk van planteigenschappen, de sedimentlading van het water en de hoogteligging van het gebied die de waterdiepte bepaald (Li and Yang 2009). Een studie van Temmerman et al. (2004) beschrijft aan de hand van veld experimenten op 25 locaties langs de (Wester)Schelde dat sedimentatiesnelheid van schorren afhankelijk is van de schor leeftijd, estuariene variatie in het Gemiddeld Hoog Water niveau (afhankelijk van tij, wind en rivierafvoer) en variatie in concentraties van gesuspendeerd sediment in het water. De verwachting is dat de zeespiegel de komende eeuw 35-85 cm gaat stijgen (KNMI 2009), om deze stijging bij te kunnen houden moet minimale sedimentatie dus tussen de 3,5-8,5 mm per jaar zijn. In de Oosterschelde, een systeem met een lage sedimentlading, treedt nog steeds sedimentatie op, maar vertonen schorren tegelijkertijd ook inklink, waardoor de absolute hoogteligging min of meer gelijk blijft (NIOZ, ongepubliceerde data). Deze schorren kunnen een stijgende zeespiegelstijging waarschijnlijk dan ook moeilijk bijhouden.

2. Grootte

Het oppervlak en voornamelijk de breedte (ook wel bereik) van een sedimentatiegebied is bepalend voor de mate waarin windgolven kunnen ontwikkelen waardoor resuspensie van gesedimenteerd materiaal kan optreden. Een studie van French et al. (2000) in het Blyth estuarium in het Verenigd Koninkrijk beschrijft een erosie van -10mm/jaar in gebieden met een bereik van ca. 2000 m terwijl gebieden met een bereik kleiner dan 400 m 7-16mm/jaar opslibben. Uiteraard zijn meerdere factoren van invloed zoals sedimentlading van het water en hoogteligging van deze gebieden. Het gebied moet echter wel groot genoeg zijn zodat ecologische functies (voedselweb, successie etc.) zich kunnen ontwikkelen.

3. Vorm

Over de optimale vorm van sedimentatiegebieden is niet zo veel bekend. Het is van belang dat zich een goed krekensysteem kan ontwikkelen die zorgt voor een goede aan- en afvoer van water en sediment. De vorm kan daarbij bepalend zijn voor de mate waarin het zeewater met sediment naar binnen kan stromen. Een vorm die optimale verspreiding van het water (bijvoorbeeld vierkant) over het hele gebied bevordert is mogelijk van invloed op de sedimentatie (Van Oevelen, Van den Bergh et al. 2000).

4. Sedimentlading zeewater

Naast de hoogteligging is de sedimentlading in het zeewater zeer bepalend voor de mate van opslibbing. De sedimentlading is in elk estuarien systeem verschillend en kan ook in ruimte en tijd veel verschillen (dit is afhankelijk van stroming, rivierafvoer, bovenstrooms landgebruik etc.). Bij lage sedimentconcentraties 1-10 mg/L kan een schor overleven bij een paar mm zeespiegelstijging per jaar. Bij een sedimentconcentratie van 30-100 mg/L is dit enkele centimeters per jaar (Borsje, Van Wesenbeeck et al. 2011). Daarbij is het van belang om het beschikbare sediment te accommoderen.

Sediment slaat met name neer in ondiepe gebieden. Het grootste deel van het sediment in de delta wordt aangevoerd vanuit zee en in mindere mate vanuit de rivieren (uitkomst workshop, zie bijlage 1).

Door de aanleg van de opslibgebieden zal de komberging toenemen. Volgens de theorie van Friedrichs & Aubrey (1988) betekent dit een afname van de vloeddominantie cq. een toename van de eb-dominantie en hierdoor, mogelijkwerwijs, een afname van de import cq. een toename van de export van sediment (uitkomst workshop, zie bijlage 1).

5. Kreeken en water aan- en afvoer en helling

Kreeken zijn van cruciaal belang voor de opslibbing van een gebied en ontwikkeling van vegetatie (Figuur 19). Via de kreeken wordt met hoogtij het water met sediment het gebied binnen gevoerd. Met laagtij zorgen de kreeken voor een goede afwatering waardoor het sediment kan consolideren (Wolters, Garbutt et al. 2005). Een goede afwatering is tevens van belang voor vegetatieontwikkeling. Wanneer de uitgangshoogte van het gebied subtidaal is, gaat de opslibbing erg traag en blijft het kreekenpatroon lange tijd embryonaal. Bij laag tot gemiddeld slikniveau evolueren de gebieden relatief sneller naar een jong schor met een vertakt kreekenstelsel met vooral kleine kreekjes (Temmerman, Govers et al. 2003). Het uitgraven van kreeken met vertakkingen kan bijdragen aan de ontwikkeling van slikken door een verbeterde drainage (Dixon, Morris et al. 2008).

De helling van het gebied is ook van invloed op de ontwikkeling. Voor een goede afwatering is het van belang dat het gebied richting de zee afloopt. Hoe flauwer de helling hoe lager de stroomsnelheden en hoe beter sedimentatie kan plaatsvinden. Schor kan ontwikkelen bij een helling van 0-7% (1:0-1:18), de optimale helling voor schorontwikkeling is tussen 1-2% (1:0-1:64) (Burd 1995).

Communicatie en draagvlak

Het onder water zetten van binnendijs gebied is vooralsnog een omstreden maatregel. Het betekent meestal verlies van landbouwgrond en betekent dat mensen in het gebied moeten verhuizen. Dit is zeer ingrijpend voor de mensen die er wonen maar ook voor omwonenden. Het is dan ook van belang de keuze zorgvuldig af te wegen en directe betrokkenen goed te informeren en te betrekken in het proces.

Tabel 2, een overzicht van richtlijnen en randvoorwaarden voor de ontwikkeling van slikken en schorren in sedimentatiegebieden.

Criteria	Grenswaarde	Habitat	Opmerkingen	Literatuur
Locatie selectie	Voormalige inpolderingen	Schor	Plekken waar schorren aanwezig waren vóór inpoldering en waar erosie beperkt is (relatief beschut) zijn meest geschikt.	(French 2006)
	Extensief landgebruik voor onderwater zetting	Schor	Gebieden waar het landgebruik zodanig was dat de ondergrond relatief onverstoord is gebleven zijn het meest geschikt. Zo zal een voormalig weiland bijvoorbeeld meer potentie hebben om tot een schor te ontwikkelen dan een beploegde en bemeste akker.	(French 2006)
Hoogteligging	GHWS-GHWD	Schor	Minimum van 400-500 inundaties per jaar. Vanaf 1m beneden GHWD vindt kolonisatie van pionier vegetatie plaats.	(Toft and Maddell 1995) (French 2008)
	GHWD-GLWS	Slikken		
Verhang	Possible: 0-7% (1:0-1:18) Optimal: 1-2% (1:0-1:64)	Schor	Verhang bepaalt de mate van drainage. Een geleidelijk verhang in zeewaartse richting zorgt voor beperkte stroomsnelheden en bevordert sedimentatie.	(Burd 1995)
Grootte	Bereik < 2000m	Schor Slikken	Het "bereik" (lengte of breedte) en diepte van een gebied bepalen de mate waarin de wind vat kan krijgen en golven kunnen ontwikkelen waardoor resuspensie van sediment optreedt. Een studie door French et al. (2000) beschrijft een erosie van 10mm/jaar in gebieden met een bereik van 2000m een sedimentatie van 7-16mm/jaar met een bereik van 400m.	(French, French et al. 2000)
Vorm	Lengte/breedte verhouding		De vorm kan bepalend zijn voor de mate waarin het zeewater met sediment naar binnen kan stromen. Een vorm die optimale verspreiding van het water (bijvoorbeeld vierkant) over het hele gebied bevordert is mogelijk van invloed op de sedimentatie.	(Van Oevelen, Van den Bergh et al. 2000)
Sediment lading water	1-10 mg/l overleving * 10-100 mg/l groei	Schor Slikken	Groei van schorren hangt af van de mate van zeespiegelstijging. *Naast de sedimentlading van het water hangt de mate van sedimentatie ook af van hoogteligging die de waterdiepte bepaald, vegetatie eigenschappen en estuariene variabelen (rivierafvoer en getij).	(Borsje, Van Wesenbeeck et al. 2011) (Li and Yang 2009) (Temmerman, Govers et al. 2004)



Figuur 19, een goed ontwikkeld krekensysteem in slikken en schorren is van belang voor opslibbing en ophoging van deze gebieden. Ze zorgen van aanvoer van water en sediment met vloed en de snelle afvoer van water met eb zodat het sediment kan neerslaan.

Mogelijkheden voor uitvoering

Pontee (2007) onderscheidt drie verschillende typen van sedimentatiegebieden ("managed realignment"):

- a. Verwijderen/verplaatsen van de primaire dijk ("banked realignment")
- b. Dijk met doorstroom openingen ("breached realignment")
- c. Gecontroleerde overstrooming via een sluis of duiker in de dijk ("regulated tidal exchange")

a. Verwijderen/verplaatsen van de primaire dijk

De eerste optie betreft het volledig verwijderen en landinwaarts terugplaatsen van de primaire dijk waardoor het achterliggende gebied weer vrij overstroomd wordt. Bij Welwick aan het Humber estuarium in Noord Engeland is een van de weinige voorbeelden waar de dijk volledig is verwijderd (Pontee 2007). Dit betrof een compensatie voor een nabije havenuitbreiding waarbij schorgebied verloren ging. Het voordeel van deze maatregel is dat er een volledig open verbinding met de zee wordt bewerkstelligd.

De reden dat deze maatregel weinig wordt toegepast heeft mogelijk te maken met de hoge kosten die gemoeid zijn bij het volledig verwijderen van de dijk en het aanleggen van een nieuwe dijk aan de landzijde van het gebied. Door een hogere golfaanval vergeleken met het (gedeeltelijk) handhaven van de primaire dijk moet de nieuwe dijk ook bestand zijn tegen een hogere golfaanval. Een tweede reden zou kunnen zijn dat door het verwijderen van de dijk, wind, golven en stroming vrij spel hebben. Dit kan leiden tot erosie waardoor schorren niet of zeer traag tot ontwikkeling kunnen komen.

b. Dijk met doorstroom openingen

Door de dijk op een of meerdere plaatsen van een doorstroom opening te voorzien behoudt men meer controle over het gebied als bij het volledig verwijderen van de dijk. Het gebied wordt aan de landzijde omsloten door een tweede dijk om de veiligheid te waarborgen. Dit betekent minder graafwerk maar het zorgt ook voor meer beschutting van het gebied waardoor de golfaanval op het gebied en de tweede dijk lager zal zijn. De interactie met het estuariene systeem is bij deze maatregel beperkter als bij het volledig verwijderen van de dijk.

Het is van belang dat de openingen in de dijk breder zijn dan de breedte van de ebgeul. Eerdere ervaringen hebben uitgewezen dat een groter risico op zeer hoge stroomsnelheden ontstaat als de opening te smal is waardoor schade aan de geperforeerde dijk kan ontstaan (Dixon, Morris et al. 2008). Een studie van Townsend (2008) beschrijft een methode die houvast biedt voor de dimensionering van de stroomgaten. Deze berekening gaat uit van de maximaal toelaatbare stroomsnelheid voordat erosie optreedt, de hoogteligging van het gebied ten opzichte van de zeespiegel en stromingscondities.

c. Gecontroleerde overstrooming via sluis of duiker in de dijk

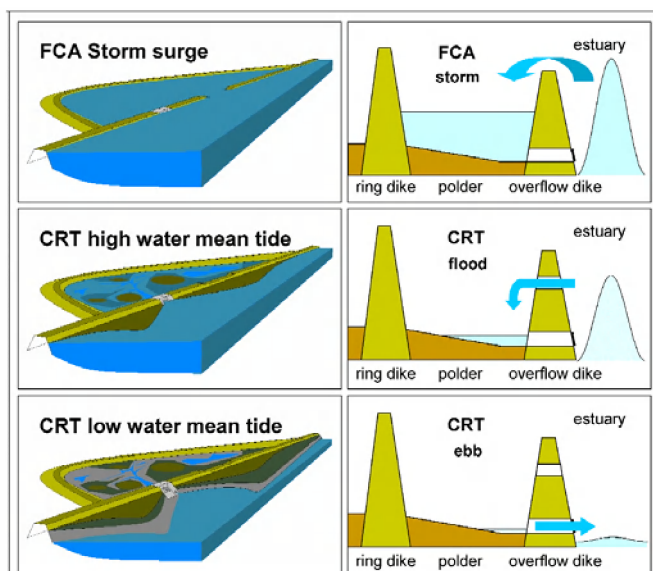
Door gebruik te maken van een sluis in de dijk kan men op zeer gecontroleerde wijze (gereduceerd) getij toelaten in een gebied dat aan de binnenzijde door een dijk omsloten is. De dijk wordt voorzien van een hoog- en laaggelegen inlaatsluis die zorgt voor de respectievelijke aanvoer van water bij hoogtij en afvoer bij laagtij. De positie van de sluizen bepalen het getijd regime in de polder. Op locaties in de riviermonding waar zoet- en zoutwater invloed is, kan de positie van de sluizen ook de waterkwaliteit bepalen (zoutgehalte en nutriënten) (Maris, Cox et al. 2007). Daarnaast zijn de dimensies van de sluizen

bepalend voor de hoeveelheid water en sediment er binnen stroomt. Gecontroleerde overstromingsgebieden met gereduceerd getij worden voornamelijk ingezet vanuit veiligheid en waterbergingsmotieven.

De voordelen van een gecontroleerde overstroming via een sluizencomplex is dat door beperkte stroming en golfslag meer sedimentatie en minder erosie plaatsvindt (Peeters, Claeys et al. 2009). Anders dan bij een natuurlijk schor neemt de waterdiepte niet af naarmate het schor hoger in de getijde prima groeit en korter (en met minder waterdiepte) overstroomd wordt doordat de hoeveelheid water die het gebied binnenstroomt via de sluizen altijd gelijk is (Vandenbruwaene, Maris et al. 2011). Daardoor hoogt een gecontroleerd overstromingsgebied sneller op dan een natuurlijk schor. Vandenbruwaene (2011) heeft berekend dat een gecontroleerd overstromingsgebied op gemiddeld hoogwater niveau over 75 jaar 2 tot 2,5 maal meer hoogte heeft gewonnen dan een natuurlijk schor. De mate van ophoging hangt echter sterk samen met lokale omstandigheden zoals de sedimentlanding van het water. Ook is de aanleg en beheer van het sluizencomplex kostbaar en daarnaast vindt ook beperkte uitwisseling plaats met het estuariene ecosysteem (bijvoorbeeld voor vissen).

➤ Voorbeeld: Gecontroleerd overstromingsgebied Lippenbroek

In maart 2006 is het Lippenbroek langs de Schelde in Vlaanderen als pilootproject in gebruik genomen als een gecontroleerd overstromingsgebied met gecontroleerd gereduceerd getij in het kader van het Sigmaplan (de Vlaamse tegenhanger van het Nederlandse Deltaplan). Via een luizenconstructie staat het gebied in contact met de Schelde, zodat er bij elk hoogtij water in het gebied stroomt, wat er bij laagtij weer uit vloeit (Figuur 20). Het gebied zorgt voor extra waterbergingscapaciteit in tijden van hoge waterstanden, bijvoorbeeld doordat deze wordt opgezet door hoogtij in combinatie met een storm. De sluizen zijn ontworpen om een waterregime in het gebied te krijgen dat streeft naar het verkrijgen van zo natuurlijk mogelijke slikken en schorren. Het Lippenbroek krijgt op deze manier zowel een veiligheidsfunctie als een natuurontwikkelingsfunctie. Momenteel wordt het veel grotere overstromingsgebied Kruibeke-Bazel-Rupelmonde aangelegd (60 ha), waar bijna de helft zal ingericht worden als gecontroleerd gereduceerd getijdegebied.



Figuur 20, het principe van een gecontroleerd overstromingsgebied met gecontroleerd gereduceerd getij (Peeters, Claeys et al. 2009).

4.3.3 Mogelijkheden voor aquacultuur

Zowel inlagen als sedimentatiegebieden bieden mogelijkheden voor medegebruik naast een veiligheidsfunctie. Daarbij valt te denken aan natuur, recreatie en alternatieve woonvormen. Ook bieden deze gebieden langs de kust potentie voor extensieve vormen van teelt van zilte gewassen en aquacultuur. Een studie van De Mesel et al. (De Mesel, Ysebaert et al. 2012 (in preparation)) heeft verkend welke vormen van aquacultuur toepasbaar zijn in tijdelijke sedimentatiegebieden ("wisselpolders"). Op basis van de resultaten van deze studie is onderstaande analyse gemaakt in Tabel 3. Daarbij is tevens een inschatting gemaakt wat de geschiktheid is van gebruiksvormen in inlagen welke doorgaans laaggelegen, brakke gebieden zijn die niet onder invloed staan van het getij. Voor de sedimentatie gebieden is een belangrijke randvoorwaarde dat de kweek of teelt de sedimentatie in het gebied niet belemmeren.

Tabel 3, mogelijkheden voor aquacultuur en zilte teelten in sedimentatiegebieden op basis van De Mesel (De Mesel, Ysebaert et al. 2012 (in preparation)), voor inlagen is een inschatting gemaakt.

	Sedimentatiegebieden	Inlagen
Vissen	Visteelt vereist een omgeving die 24 uur per dag onder water staat. De inrichting (hoogteligging) kan bepalen of het gebied met laag water helemaal droog staat of dat er delen zijn die overstroomd blijven, bijvoorbeeld in een kreek of wiel. Deze delen zijn geschikt voor kleinschalige visteelt in drijvende netten.	Visteelt is mogelijk in bassins met aanvoer van zeewater buitendijks
Schelpdieren	Evenals visteelt kunnen schelpdieren alleen gekweekt worden in de diepere delen van het gebied die elk getij weer onderlopen. Kweek op palen (mosselen) of op tafels (oesters) is hiervoor geschikt. De delen tussen de hoog- en laagwaterlijn zijn hiervoor geschikt omdat ze elk getij onderlopen en ook met laagwater toegankelijk zijn. De groei van de schelpdieren is sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van algen (voedsel), maximale duur van droogstand, zoutgehalte, temperatuur en zwevend stof.	Schelpdierteelt is mogelijk in bassins met aanvoer van zeewater buitendijks eventueel in combinatie met algenkweek
Wieren	De teelt van wieren vindt doorgaans plaats aan lijnen of andere drijvende structuren die drijven en/of onder het wateroppervlak zijn verankerd. De sporen worden gekweekt in laboratoria waar ze zich hechten aan het vestiging substraat dat gebruikt wordt voor teelt op zee. Bij sommige soorten kan de thallus direct hechten aan de lijnen en verdere uitgroeien.	Algenkweek is mogelijk in bassins met aanvoer van zeewater buitendijks.
Zilte gewassen	Zilte gewassen groeien in de hoger gelegen zone van het intergetijden gebied vanaf 1 meter beneden GHWD (French 2008). Zeekraal (<i>Salicornia europaea</i>) en Lamsoor (<i>Aster tripolium</i>) groeien van nature op de schorren. Hier worden de gewassen in het wild geplukt door particulieren die de zeegroenten verkopen aan restaurants.	Binnendijkse kweek van Zeekraal en Lamsoor is mogelijk op met zoutwater bevoeide akkers zoals bij firma Janse in Wolphaartsdijk en door firma Poleij bij Kruiningen beiden op Zuid-Beveland.
Wormen	De wormensoort die interessant is voor kweek zijn Zagers (<i>Nereis virens</i>). Ze worden in het wild gespit in droogvallende delen en gebruikt als aas bij sportvissen, als visvoer en ook voor verwerking in medicijnen.	Commerciële kweek in vijvers zoals bijvoorbeeld bij TopsyBaits in Wilhelminadorp.

5 Toepassing Oosterschelde

5.1 Huidige situatie

De Oosterschelde wordt gezien als de "parel van de delta". Naast de waardevolle ecologische waarde van het gebied is de Oosterschelde ook van groot belang voor de schelpdiersector en aantrekkelijk voor waterrecreatie (met name duikers). Door de zandhonger staan de natuurwaarden onder druk. In de Oosterschelde gelden instandhoudingsdoelstellingen (behoud van oppervlakte en kwaliteit) voor onder andere schorren en zilte graslanden (H1330) en Slijkgrasvelden (H1320). Voor Zilte pioniersbegroeiingen (H1310) geldt een uitbreidingsdoelstelling van de oppervlakte en behoud van kwaliteit. De zandhonger bemoeilijkt het behoud van deze gebieden. De MIRT-verkenning zandhonger Oosterschelde en het ANT-Oosterschelde project richten zich op dit probleem en zoeken naar maatregelen om de zandhonger te vertragen of te stoppen. Daarnaast wordt onder de regie van de Provincie Zeeland een Gebiedsvisie Oosterschelde en omgeving opgesteld waarbij een Bestuurlijk Platform is opgericht die belangrijke besluiten zal nemen over de toekomst van de Oosterschelde.

De dijken om de Oosterschelde zijn oude zeedijken. Er is doorgaans geen sprake van een hoogtekort. Verder is de zandhonger een belangrijk aandachtspunt. Als gevolg hiervan eroderen intergetijdengebieden en neemt de golfbelasting op de dijken toe. Daarnaast zijn er veel dijken langs de Oosterschelde met onvoldoende bekleding. Momenteel wordt onderhoud aan deze dijkbekledingen uitgevoerd door Bureau Zeeweringen wat in 2015 klaar moet zijn. De stormvloedkering waarborgt de veiligheid bij extreem hoge waterstanden van +3m NAP of hoger doordat deze dan gesloten wordt. De Deltacommissie (2008) heeft bepaald dat de stormvloedkering in ieder geval nog tot 2050 dienst kan doen.

5.2 Alternatieve waterkeringen in de Oosterschelde

Binnen deze studie is een globale inventarisatie gemaakt van de potentie voor toepassing van alternatieve waterkeringen in de Oosterschelde. Daarin is de volgende prioritering gehanteerd: eerst is verkend waar mogelijkheden zijn voor welke buiten- en binnendijkse mogelijkheden er zijn omdat deze oplossingen de meeste ruimte geven aan natuurlijke processen, daar waar dit niet mogelijk was worden nieuwe dijkconcepten voorgesteld. Potentiele gebieden voor toepassing van sedimentatie gebieden worden globaal als zones langs de kust aangegeven daar waar de juiste randvoorwaarden aanwezig zijn en waar weinig bebouwing is. Figuur 21 laat een weergave zien van waar de kansen liggen voor toepassing van alternatieve waterkeringen die besproken zijn in deze studie. Naast de kansen laat de kaart ook voorbeelden zien van concepten die al worden toegepast of worden onderzocht. Dit om te laten zien dat er al op meerdere plekken mee gewerkt wordt en een beeld te geven van wat in ontwikkeling is.

Biobouwers

Schelpdierriffen

Riffen van Japanse Oesters hebben in de Oosterschelde meer overlevingskansen dan mosselriffen doordat ze robuuster zijn en beter bestand zijn tegen golfaanval. Op de kaart zijn gebieden met potentie voor oesterriffen aangegeven uitgaande van de benodigde overstromingsduur van 60% om te kunnen overleven (Wijsman 2007). Dit zijn voornamelijk de gebieden die onderhevig zijn aan erosie. Oesterriffen ontwikkelen zich laag in de getijdenzone. Lokale hydrodynamische omstandigheden en sedimentdynamiek bepalen of dergelijke structuren nuttig kunnen zijn, eventueel in combinatie met het suppleren van zand. Hierbij kunnen de riffen het gesuppleerde zand langer vasthouden. Ook is het mogelijk om meerdere riffen achter elkaar te plaatsen als een cascade voor meer golfreductie. Voor toepassing op grote schaal is het nodig om te bepalen wat het effect kan zijn op de draagkracht van de Oosterschelde voor schelpdieren. De toepassing van schelpdierriffen mag niet conflicteren met de aanwezige schelpdier percelen en natuurlijke schelpdierbanken. De experimenten met oesterriffen in de

Oosterschelde lopen nog. Dit onderzoek moet nog uitwijzen wat de werking en invloed van de riffen op erosie en sedimentatie van slikken is.

Nieuwe dijken

Klimaatdijk

Daar waar binnen- of buitendijkse concepten niet mogelijk zijn, waarborgen dijken de veiligheid. Indien er voldoende ruimte is kan dit met een Klimaatdijk of een andere innovatieve dijkvorm die gebruik, ecologie en veiligheid combineert (zie (Van Loon-Steensma, Schelfhout et al. 2012))

Rijke Dijk

Daar waar dijken worden opgehoogd, bijvoorbeeld omdat de ruimte voor uitbreiding in de breedte beperkt is, kan gebruikt gemaakt worden van het Rijke Dijken concept om de ecologische waarde van de dijk te vergroten. Door het voortalen van de dijk te heterogeniseren (poeltjes, verschillende soorten substraat etc.) wordt het vestigingsklimaat voor flora en fauna geoptimaliseerd. Vanwege de stenen bekledingen van dijktaals is de Oosterschelde bij uitstek geschikt. Daarnaast kan Rijke Dijken interessant zijn voor duikers omdat er meer diversiteit ontstaat onder water.

Duindijk

De kanskaart laat een locatie zien (Sophiastrand) waar mogelijk proberen starten met het Duindijk concept. De bedoeling is hier dat een suppletie tegen of nabij de dijk de golf aanval zal verminderen en het onderhoud aan de dijk beperkt of uitgesteld kan worden. Nader onderzoek moet de werking en specifieke randvoorwaarden voor dit concept uitwijzen.

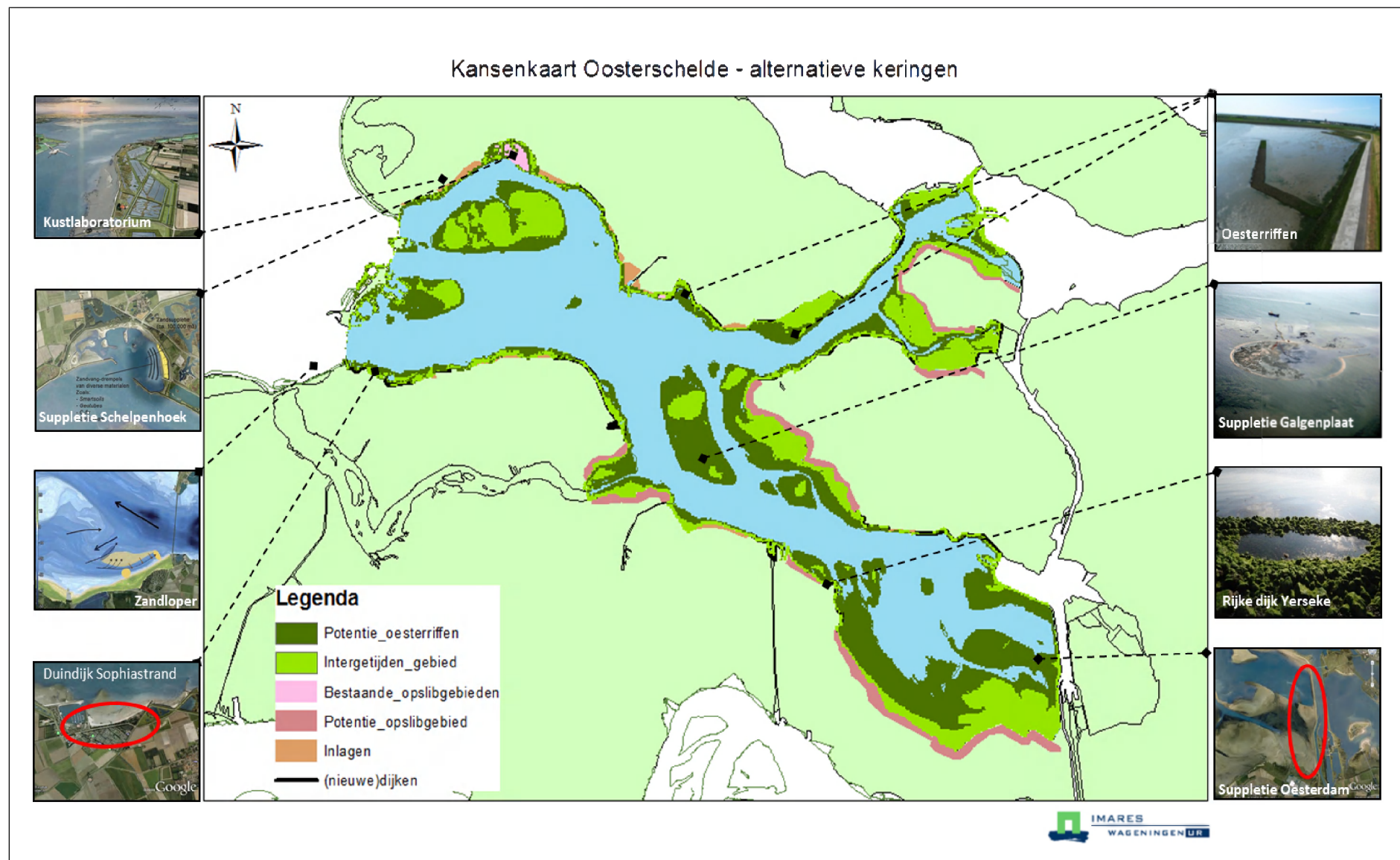
Bestaande en potentiële opslibgebieden

Op sommige plaatsen zijn al sedimentatiegebieden aanwezig in de Oosterschelde. Dit zijn beschutte gebieden zoals voormalige haventjes en inhammen langs de Oosterschelde zoals de Oesterput op Noord-Beveland of de inham bij de Heerenkeet nabij Kerkwerf. Hoewel er beperkte informatie is over de opslibbing van deze gebieden, liggen ze zichtbaar hoger dan de slikken buiten de beschutting. Dit zijn werkelijke voorbeelden van opslibgebieden.

De potentie voor opslibgebieden langs de Oosterschelde ligt vooral op plaatsen waar voor inpoldering al schor aanwezig was en gebieden met beperkte erosie. De kansen hiervoor liggen met name in de Kom van de Oosterschelde en bij Tholen en Sint Philipsland. Voor het maken van de kanskaart is uitgegaan van de variant waarbij een of meerdere bressen in de dijk worden aangebracht in combinatie met een secundaire dijk die het gebied aan de binnenzijde omsluit. Dit is de meest toegepaste vorm. De kanskaart geeft de locaties in de Oosterschelde die op basis van de eerder besproken randvoorwaarden (paragraaf 4.3) geschikt zijn. Een belangrijk punt voor de werking van de sedimentatie gebieden is de sedimentlading van het water, deze is in de huidige situatie te laag voor opslibbing van sedimentatiegebieden (uitkomst workshop, bijlage 1).

Inlagen

Inlagen zijn van historische oorsprong al aanwezig in de Oosterschelde. De kanskaart geeft aan waar inlagen als concept kunnen worden toegepast. Dit betreft veelal laaggelegen gebieden langs de kust waar tevens een tweede binnendijk aanwezig is. Hier kan een veiligheidszoning worden toegepast van bijvoorbeeld 1/100 of 1/500 jaar waarbij beperkte golfoverslag over de primaire dijk wordt toegelaten. Inlagen zijn aangegeven in gebieden waar sedimentatiegebieden niet mogelijk zijn, bijvoorbeeld doordat het gebied naast een diepe stroomgeul ligt waar erosie te verwachten is.



Figuur 21, kansenkaart van de Oosterschelde: voorbeelden van initiatieven en kansen voor toepassing van alternatieve waterkeringen.

6 Conclusie en discussie

Conventionele keringen

Dijken zijn al eeuwenlang een effectieve manier van kustverdediging en hebben ze een belangrijke rol gespeeld in het uitbreiden en inpolderen van nieuw land. Gemaakt van gebiedseigen materiaal kunnen ze relatief gemakkelijk aangepast (opgehoogd of verstevigd) worden en zijn ze een relatief goedkope oplossing voor laaggelegen kustgebieden met een lage grondprijs (Brampton 2002). Echter zorgen dijken ook voor een steeds groter wordend hoogteverschil tussen een stijgende zeespiegel en een inklinkende bodem. Doordat ze statisch zijn, zijn dijken niet gemakkelijk aan te passen op veranderende omstandigheden zoals zeespiegelstijging en belemmeren ze natuurlijke sedimentatie. Daarnaast zorgt een groter verhang tussen land en zee ervoor dat als de dijk breekt de impact van een overstroming groter is. Ook veroorzaakt dit een toename in zoute kwel binnendijks.

Alternatieve waterkeringen

“Alternatieve waterkeringen” zijn nieuwe typen (of aanpassingen aan) keringen die veiligheid bieden tegen overstromingen maar ook gericht zijn op meer ruimte voor natuurlijke processen. De mogelijkheden voor nieuwe typen keringen hangen nauw samen met lokale omstandigheden. Alternatieve waterkeringen zoals besproken in deze studie resulteren doorgaans in bredere keringen die in zee- en/of landwaartse richting zijn uitgebreid en bieden meer mogelijkheden voor medegebruik zoals aquacultuur, natuur en recreatie dan reguliere dijken. Bredere keringen zijn robuuster en kunnen een rol vervullen in het ecologisch functioneren van de aanliggende wateren van belang voor de ecologische veerkracht van het systeem (zie BO taak 1 Ecologische begrippen). Type keringen gericht op het vasthouden van sediment en bevorderen van sedimentatie kunnen onder de juiste randvoorwaarden meestijgen met de zeespiegelstijging (zoals Sedimentatiegebieden of buitendijkse slikken en schorren) en op lange termijn bijdragen aan een robuuste kustzone.

Buitendijkse concepten bestaan uit behoud of uitbreiden van voorlanden waardoor de golfaanval op de kust afneemt en meer intergetijdengebied ontstaat met waardevol habitat voor mariene en estuariene soorten. Mogelijkheden zijn inzet van kunstmatige schelpdierriffen die erosie remmend werken of suppletie oplossingen, waarbij een suppletie daar waar nodig wordt aangebracht of op een strategische locatie wordt neergelegd zodat het zand door waterbeweging op de juiste plaats komt (zandmotor en zandloper).

Nieuwe concepten voor aanpassingen aan de dijk zelf zijn gericht op het veiliger en/of ecologisch aantrekkelijker maken met kansen voor mede gebruik zonder dat deze hoeft worden opgehoogd. Een Klimaatdijk is een overgedimensioneerde, brede dijk die zo robuust is dat bij overlopen als gevolg van extreem hoge waterstanden de dijk niet bezwijkt (Vellinga 2008). Door het brede ontwerp is echter wel veel meer ruimte nodig dan bij een reguliere dijk (Van Loon-Steensma, Schelfhout et al. 2012), maar door het flauwe en brede talud ontstaan ook weer mogelijkheden voor gebruik zoals recreatie en woonvormen. Andere nieuwe dijk concepten zijn de Duindijk, waarbij door een suppletie tegen het dijktaalud aan de zeezijde onderhoud en ophoging van de dijk uitgesteld kunnen worden. Een concept wat niet op veiligheid gericht is maar op ecologie is het Rijke Dijken concept, waarbij door het heterogeniseren van het dijktaalud meer vestigingskansen voor flora- en fauna ontstaan.

Binnendijkse maatregelen zijn erop gericht de kustverdediging in binnendijkse richting te verbreden naar een kustzone met een meer geleidelijke overgang tussen land en zee. Het concept van Inlagen is een manier om overstromingsrisico's te zoneren door gebruik van een binnendijk met daartussen in een overgangszone die mogelijkheden biedt voor recreatie en aquacultuur. Bij sedimentatiegebieden wordt binnendijks gebied onder invloed van het getij gezet. Onder de juiste randvoorwaarden treedt schorvorming op waardoor het gebied kan opslibben en kan meegroeien met de zeespiegelstijging. Dit draagt bij aan een robuuste, veilige kustzone en is daarnaast ook een manier om verlies van intergetijden gebied te compenseren bijvoorbeeld als habitat herstel in het kader van Natura 2000. De

voortzettende trend van vermindering van slikken en schorren gebied door bijvoorbeeld havenuitbreidingen, zeespiegelstijging en erosie zullen in de toekomst om meer compensatie vragen (Pontee 2007).

Kansen voor de Oosterschelde

De veiligheid langs de Oosterschelde wordt gewaarborgd door dijken en bij extreem hoog water (>3m NAP) gaat de stormvloedkering dicht. Naast de waardevolle ecologische waarde van het gebied is de Oosterschelde ook van groot belang voor de schelpdiersector en aantrekkelijk voor waterrecreatie (met name duikers). Door de zandhonger staan de natuurwaarden onder druk en als gevolg hiervan eroderen intergetijdengebieden en neemt de golfbelasting op de dijken toe. Kansen voor alternatieve waterkeringen in de Oosterschelde zijn met name de Inlagen, toepassing van Oesterriffen en Nieuwe dijken zoals Klimaatdijk, Duindijk en Rijke Dijk. Het lopende experiment met oesterriffen moet echter hun werking nog uitwijzen. Door een sedimenttekort in de Oosterschelde en de relatief lage sedimentlading van het water hebben Sedimentatiegebieden weinig potentie doordat ze niet genoeg sediment zullen ontvangen om de zeespiegelstijging bij te houden. Zo heeft de Westerschelde meer potentie voor toepassing van Sedimentatiegebieden omdat de sedimentbeschikbaarheid daar veel hoger is.

Aanbevelingen

Deze studie geeft een samenhangend overzicht van verschillende typen alternatieve waterkeringen en de meerwaarde die deze concepten bieden naast veiligheid op het gebied van ecologie en gebruik. Een overzicht hiervan is niet alleen relevant voor de lange termijn verkenning van het Deelprogramma Zuidwestelijke Delta maar ook voor andere Deelprogramma's zoals Kust en Wadden.

Naast een overzicht van alternatieve waterkeringen laat de kansenkaart potentiële toepassingsrichtingen zien in de Oosterschelde. Op hoofdlijnen geeft de globaal kaart aan waar potentie is voor toepassing van bepaalde concepten op basis van de randvoorwaarden die kan dienen als inspiratiekaart voor de lange termijn verkenning. Zo zijn gebieden met een overstromingsduur van minimaal 60% geschikt voor groei van Japanse oesters (*Crassostrea gigas*) en toepassing van oesterriffen. Daarnaast wordt ook aangegeven welke zones langs de Oosterschelde potentie hebben voor sedimentatiegebieden. Voor de inlagen zijn de bestaande historische dubbeldijken langs de kust aangegeven. In principe wordt dit concept dus al toegepast, alleen wordt er nog geen zoneringsnormering toegepast waardoor de primaire dijk een versoepelde veiligheidsnorm zou krijgen. Tot slot wordt ook aangegeven op welke plaatsen alternatieve waterkeringen al toegepast worden of worden onderzocht en dit geeft een beeld van de lopende ontwikkelingen.

De alternatieve waterkeringen besproken in deze studie zijn nog jonge concepten in ontwikkeling. Sommigen worden al ingezet als kustverdediging (zoals Sedimentatiegebieden in het Verenigd Koninkrijk) en andere zijn nog in een onderzoeks-/pionierfase (Schelpdierriffen, Strategisch suppleren, Inlagen, Duindijk, Rijke Dijken) of zelfs nog een concept wat nog niet is toegepast (Klimaatdijk). Om de werking en mogelijkheden voor toepassing beter te begrijpen is meer ervaring, onderzoek en monitoring van bestaande concepten nodig. De kennis die hieruit ontwikkelt kan worden gegeven voeding aan de strategiekeuze voor de lange termijn veiligheid van de Zuidwestelijke Delta.

Deze studie beschrijft alternatieve waterkeringen die veiligheid bieden of vergroten, maar te gelijktijd meer ruimte bieden voor natuurlijke processen. Dit strookt met de ambities van de Deltaprogramma Zuidwestelijke Delta om naast een veilige delta ook een ecologisch veerkrachtige delta te ontwikkelen. Zo wordt een veerkrachtige delta in het Uitvoeringsprogramma Zuidwestelijke Delta benoemd als "...een gezond watermilieu en ruimte voor de belangrijkste schoonheid van de delta, de overgangen tussen zoet en zout en tussen nat en droog" (Zuidwestelijke Delta 2010). Alternatieve waterkeringen kunnen met name bijdragen aan een meer geleidelijke overgang van land naar zee. Daarnaast wordt in ook aandacht besteed aan de mogelijkheden voor gebruik op het gebied van aquacultuur en de economische meerwaarde die alternatieve waterkeringen kunnen hebben. Dit strookt met de ambitie voor het

ontwikkelen van een economisch vitale delta, echter waren de economische aspecten niet de hoofd focus van dit rapport en zijn meerwaarde voor bijvoorbeeld landschap, recreatie en toerisme niet belicht.

Een vervolgstudie zou mogelijk dieper in kunnen gaan op de vergelijking van conventionele kustverdediging (dijken) en alternatieve waterkeringen gericht op ecologische aspecten (toename habitat, vestigingsmogelijkheden, foerageergebied etc.) en de economische kant gericht op kosten, baten en maatschappelijke meerwaarde.

7 Referenties

Adviescommissie Financiering Primaire Waterkeringen (2006). Tussensprint naar 2015: Advies over de financiering van de primaire waterkeringen voor de bescherming van Nederland tegen overstroming. Rotterdam: 74.

Baptist, M. (2011). Zachte kustverdediging in Nederland; scenario's voor 2040. Texel, Wageningen IMARES: 61.

Baptist, M. J. (2011). Zachte kustverdediging in Nederland; scenario's voor 2040, achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu.

Barbier, E. B., S. D. Hacker, et al. (2011). "The value of estuarine and coastal ecosystem services." Ecological Monographs 81(2): 169-193.

Borsje, B. W., B. K. Van Wesenbeeck, et al. (2011). "How ecological engineering can serve in coastal protection." Ecological Engineering 37: 122.

Brampton, A. (2002). ICE Design and Practice Guides: Coastal Defence. London, Thomas Telford Publishing.

Burd, F. H. (1995). Managed retreat: a practical guide. Peterborough, English Nature.

Day, J. W., N. P. Psuty, et al. (2000). The role of pulsing events in the functioning of coastal barriers and wetlands: implications for human impact, management and the response to sea level rise. In: Wienstein, M.P., Dreeger, D., Concepts and Controversies in Salt Marsh Ecology. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.

De Bel, M., A. H. H. M. Schomaker, et al. (2011). Meerwaarde Levende Waterbouw, een maatschappelijke kostprijsanalyse, Rijkswaterstaat Waterdienst: 62.

De Mesel, I., T. Ysebaert, et al. (2012 (in preparation)). Klimaatbestendige dijken, het concept wisselpolders IMARES.

de Vries, M. B., T. J. Bouma, et al. (2007). "Biobouwers van de kust. Rapport haalbaarheidstudie."

Deltacommissie (2008). Werken met Water.

Directie Regionale Zaken (2008). Aanwijzingsbesluit Natura 2000 Voordelta, Ministerie van LNV.

Dixon, M., R. K. A. Morris, et al. (2008). "Managed realignment: lessons from Wallasea, UK." Proceedings of the Institution of Civil Engineers 161(2): 61-71.

Eertman, R. H. M., B. A. Kornman, et al. (2002). "Restoration of the Sieperda Tidal Marsh in the Scheldt Estuary, The Netherlands." Restoration Ecology 10(3).

Ellen, G., M. Boers, et al. (2011). Multifunctioneel medegebruik van de waterkering, Deltares 41.

Environment Agency (1998). Humber estuary: State of the Environment Report 1998.

Fiselier, J., N. Jaarsma, et al. (2011). Perspectief Natuurlijke keringen: Een eerste verkenning ten behoeve van het Deltaprogramma: 60.

French, C. E., J. R. French, et al. (2000). "Sedimentation-erosion dynamics of abandoned reclamations: the role of waves and tides." *Continental Shelf Research* 20: 1711-1733.

French, J. R. (2008). "Hydrodynamic Modelling of Estuarine Flood Defence Realignment as an Adaptive Management Response to Sea-Level Rise." *Journal of Coastal Research* 24(2B): 1-12.

French, P. W. (2006). "Managed realignment - The developing story of a comparatively new approach to soft engineering." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 67: 409-423.

Garbutt, A. (2008). Restoration of intertidal habitats by the managed realignment of coastal defences, UK. 'Dunes and Estuaries 2005' – International Conference on Nature Restoration Practices in European Coastal Habitats, Koksijde, Belgium.

Gedan, K. B., M. L. Kirwan, et al. (2011). "The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm." *Climatic Change* 106(1): 7-29.

Gemeente Tiel (2009). Klimaatdijk Tiel, Bidbook Ruimtelijke ontwikkelingskansen. Tiel, Gemeente Tiel.

Hartog, M., J. M. Van Loon-Steensma, et al. (2009). Klimaatdijk, een verkenning, Kennis voor Klimaat: 88.

Hoogheemraadschap van Rijnland (2007). Noordwijk: dijk in de duinen.

Huisman, P., W. Cramer, et al. (1998). Water in the Netherlands. Delft.

Jacobse, S., O. Scholl, et al. (2008). Prognose van Schor- en slikontwikkelingen in de Oosterschelde. Een analyse naar de te verwachten ontwikkelingen tot 2060, Rijkswaterstaat.

Kirwan, M. and S. Temmerman (2009). "Coastal marsh response to historical and future sea-level acceleration." *Quaternary Science Reviews* 28: 1801-1808.

KNMI (2009). "Zeespiegelstijging." from <http://www.knmi.nl/cms/content/73883/zeespiegelstijging>.

Kornman, B. A. and A. Schouwenaar (2001). Kleidijken en groene dijken in de Westerschelde, voorspelling ligging schorranden in 2050, RIKZ.

Lengkeek, W., S. Bouma, et al. (2007). Het effect van zuurstofdeficiëntie op het bodemleven in het Grevelingenmeer. Een blik onder water. Culemborg, Bureau Waardenburg.

Li, H. and S. L. Yang (2009). "Trapping Effect of Tidal marsh Vegetation on Suspended Sediment, Yangtze Delta." *Journal of Coastal Research* 25(4): 915-924.

Maris, T., T. Cox, et al. (2007). "Tuning the tide: creating ecological conditions for tidal marsh development in a flood control area." *Hydrobiologia* 588: 31-43.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007). Waterveiligheid: begrippen begrijpen. Den Haag.

Möller, I. I., T. Spencer, et al. (2001). "The sea defence value of salt marshes: field evidence from north Norfolk." *Water and Environmental Management* 15(2): 109-116.

Mulder, J. P. M., J. Cleveringa, et al. (2010). *Sedimentperspectief voor de Zuidwestelijke Delta*, Deltares.

Peeters, P., S. Claeys, et al. (2009). Sediment behaviour within a flood control area with a controlled reduced tide - pilot project Lippenbroek. Congrès SHF-31^{ème} Journées de l'hydraulique: "Morphodynamiques et débits solides dans les estuaires, les baies et les deltas" Paris: 1-15.

Piazza, B. P., P. D. Banks, et al. (2005). "The potential for created oyster shell reefs as a sustainable shoreline protection strategy in Louisiana." *Restoration Ecology* 13(3): 499-506.

Pontee, N. I. (2007). "Realignment in Low-lying coastal areas." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 160(4): 155-166.

Programmadirectie Natura 2000 (2009a). *Aanwijzingsbesluit Natura 2000 Westerschelde & Saeftinghe*, Ministerie van LNV.

Programmadirectie Natura 2000 (2009b). *Aanwijzingsbesluit Natura 2000 Oosterschelde*. M. v. LNV.

Rijkswaterstaat (2004). *Combikering Den Helder? Een verkenning van zeeweren in de toekomst*: 76.

Ronde, J. (2008). *Toekomstige langjarige suppletiebehoefte*, Deltares.

Scyphers, S. B., S. P. Powers, et al. (2011). "Oyster Reefs As Natural Breakwaters Mitigate Shoreline Loss and Facilitate Fisheries." *PLoS ONE* 6(8).

Tauw (2008). *Innovatielocatie Schelpenhoek*.

Temmerman, S., G. Govers, et al. (2003). "Modelling long-term tidal marsh growth under changing tidal conditions and suspended sediment concentrations, Scheldt estuary, Belgium." *Marine Geology* 193: 151-169.

Temmerman, S., G. Govers, et al. (2004). "Modelling estuarine variations in tidal marsh sedimentation: response to changing sea level and suspended sediment concentrations." *Marine Geology* 212: 1-19.

Toft, A. R. and R. J. Maddell (1995). *A guide to the understanding and management of salt marshes*. Peterborough, NRA.

Townsend, I. H. (2008). "Breach design for managed realignment." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 161(1): 9-21.

Van der Zwan, I. and E. Tromp (2010). *Inventarisatie concepten Innovatief Waterkeren*: 44.

Van Loon-Steensma, J., H. Schelfhout, et al. (2012). *Verkenning innovatieve dijken in het Waddengebied: een verkenning naar mogelijkheden voor innovatieve dijken in het Waddengebied*. Wageningen, Alterra.

Van Oevelen, D., E. Van den Bergh, et al. (2000). *Literatuuronderzoek naar ontpolderingen*. : 50pp.

Van Sluis, C. J. and Y. Ysebaert (2012(in perparation)). Combining aquaculture and coastal defence: Opportunities in the Dutch Delta. Yerseke, IMARES Wageningen UR.

Van Winden, A., M. Tangelder, et al. (2010). Met Open Armen, voor het belang van veiligheid, natuur en economie.

Van Zanten, E. and L. A. Adriaanse (2008). Verminderd getij. Verkenning van mogelijke maatregelen om de erosie van platen, slikken en scorren van de Oosterschelde te beperken. Middelburg, Rijkswaterstaat Zeeland.

Vandenbruwaene, W., T. Maris, et al. (2011). "Sedimentation and response to sea-level rise of a restored marsh with reduced tidal exchange :comparison with a natural tidal marsh." *Geomorphology* 130(3/4): 115-126.

Vellinga, P. (2008). Hoogtij in de Delta. In augurale rede door prof.dr.ir. Pier Vellinga bij de aanvaarding van de leerstoel Klimaatverandering, water en veiligheid. Wageningen, WUR.

Vellinga, P., N. Marinova, et al. (2009). "Adaptation to Climate Change; A Framework for Analysis with Examples from the Netherlands." *Built Environment* 35(4): 452-470.

Vellinga, P., N. Marinova, et al. (2009). "Climate-proofing the flood protection of the Netherlands." *Netherlands Journal of Geosciences-Geologie En Mijnbouw* 88(1): 3-12.

Verbeek, H. and C. Storm (2001). "Tidal Wetland Restoration in The Netherlands." *Journal of Coastal Research*(27): 192-202.

Wijsman, J. W. M. (2002). Stratificatie en zuurstofdeficiëntie in het Grevelingenmeer, RIKZ Middelburg: 64.

Wijsman, J. W. M. (2007). Effecten van zandhonger in de Oosterschelde op kokkels, oesters en de kweek van oesters en mosselen. Yerseke, IMARES: 28.

Wolters, M., A. Garbutt, et al. (2005). "Salt-Marsh restoration: evaluation the success of de-embankments in north-west Europe." *Biological Conservation* 123: 249-268.

Zuidwestelijke Delta (2010). Veilig, Veerkrachtig en Vitaal, Ontwerp-Uitvoeringsprogramma Zuidwestelijke Delta 2010-2015+. S. Z. Delta, Stuurgroep Zuidwestelijke Delta: 87.

Zuidwestelijke Delta (2011). Lange termijn verkenning Zuidwestelijke Delta: Probleemanalyse fase 1, opgaven en verkenning van oplossingsrichtingen 2011-2050-2100: 98.

8 Kwaliteitsborging

IMARES beschikt over een ISO 9001:2008 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem (certificaatnummer: 57846-2009-AQ-NLD-RvA). Dit certificaat is geldig tot 15 december 2012. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV Certification B.V. Daarnaast beschikt het chemisch laboratorium van de afdeling Milieu over een NEN-EN-ISO/IEC 17025:2005 accreditatie voor testlaboratoria met nummer L097. Deze accreditatie is geldig tot 27 maart 2013 en is voor het eerst verleend op 27 maart 1997; deze accreditatie is verleend door de Raad voor Accreditatie.

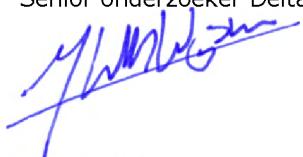
9 Verantwoording

Rapportnummer : C069/12
Projectnummer : 4308302004

Dit rapport is met grote zorgvuldigheid tot stand gekomen. De wetenschappelijke kwaliteit is intern getoetst door een collega-onderzoeker en het betreffende afdelingshoofd van IMARES.

Akkoord: Dr. J.W.M. Wijsman
Senior onderzoeker Delta

Handtekening:



Datum: 26 juni 2012

Akkoord: Dr. B.D. Dauwe
Afdelingshoofd Delta

Handtekening:



Datum: 26 juni 2012

Bijlage A. Samenvatting BwN workshop Lange termijn visie ZWD

De Zuidwestelijke Delta zonder dammen, oplossing voor de lange termijn?

Discussie over de hydro-morfologische haalbaarheid van een Zuidwestelijke Delta zonder dammen en met sedimentatie gebieden als oplossing voor de lange termijn veiligheid.

Delft, 8 november 2011

Aanwezig: Anneke Hibma (Ecoshape, Van Oord), Albert Oost (Deltares), Zhengbing Wang (Deltares), Thijs van Kessel (Deltares), Luca van Duren (Deltares), Laura Uunk (Ecoshape, Van Oord), Tom Ysebaert (Imares Wageningen UR), Jebbe van der Werf (Deltares), Marijn Tangelder (Imares Wageningen UR)

Inleiding

Het programma **Building with Nature** onderzoekt gebruik van dynamiek van het natuurlijke systeem bij het ontwikkelen van water-gerelateerde infrastructuur. Hierbij gaat het om het slim benutten van water stroming, getij en sedimentatie en erosie.

In de **case Zuidwestelijke Delta** onderzoeken we onder andere oplossingsrichtingen voor de lange termijn (2100) gebruik makend van "Building with Nature maatregelen" dus met name gericht op vrijgeven en benutten van natuurlijke waterbeweging en sedimentatie ten behoeve van veiligheid en gebruik. In dit kader verkennen we verschillende "extreme scenario's" voor de Zuidwestelijke Delta met als doel uiteindelijk tot een realistische denkrichting te komen.

De workshop spitst zich toe op een van deze extreme scenario's: het "**natuurlijke scenario**". Dit scenario is erop gericht om in extreme mate natuurlijke dynamiek weer toe te laten, maar wel de veiligheid te blijven garanderen. Alle dammen worden verwijderd. Op plekken langs de kust waar geen voorlanden (slikken en schorren) aanwezig zijn om de golfaanval te dempen worden binnendijkse oplossingen onderzocht. Zo worden laaggelegen gebieden binnendijks ingericht als "sedimentatie gebied". Door deze gebieden te ontpolderen ontvangen ze met elk getij sediment waardoor ze langzaam ophogen en er langs de kust een hoger gelegen zone ontstaat die meegroeit met de zeespiegel. In het natuurlijke scenario bestaat uit de volgende ingrepen:

- Alle deltawerken worden verwijderd-> volledig open verbinding tussen rivieren en zee'
- Langs de kust worden binnendijkse zones van sedimentatie gebieden (groeilanden) aangelegd -> van kustlijn (dijken) naar kustzone (sedimentatie gebieden)
- Deltadijken op plekken waar geen binnendijkse ruimte is. Deltadijken zijn zodanig breed dat een doorbraak vrijwel uitgesloten is.
- Beschermen van buitendijkse slikken en schorren gebieden (voorlanden) voor de kust

Tijdens de workshop geeft Marijn een korte toelichting van het natuurlijke scenario en het doel van de workshop. Hieronder volgen de belangrijkste bevindingen van de workshop.

Effecten verwijderen deltawerken en grootschalige beschouwing sedimentatiegebieden

- Processen die door de aanleg van de Deltawerken in gang zijn gezet, zijn waarschijnlijk omkeerbaar, i.e. als alle Deltawerken worden verwijderd, streeft het systeem naar een nieuw evenwicht nagenoeg gelijk aan de situatie voorafgaand aan de aanleg.
- In de Oosterschelde is geen zandhonger meer, doordat het getijvolume weer maximaal is door een volledig open verbinding met de Noordzee.
- De Oosterschelde was voor de deltawerken een zand exporterend systeem, waarschijnlijk wordt het dat weer als je de deltawerken weer verwijderd.
- De Voordelta's van de verschillende getijdenbekkens beïnvloeden elkaar.
- De Voordelta's hebben over het algemeen sediment verloren door de aanleg de Deltawerken. Als deze verwijderd worden, worden ze naar alle waarschijnlijkheid weer aangevuld met sediment uit de geulen in de bekkens, maar misschien ook met zand van de kust (kusterosie).
- Het grootste deel van het sediment in de delta wordt aangevoerd vanuit zee en in mindere mate vanuit de rivieren.

- In het Haringvliet en Hollandsch Diep wordt vervuild slib gemobiliseerd wat daar in de jaren 70' op de bodem is afgezet en vervolgens geconsolideerd is. De mate van consolidatie zal bepalen hoe snel erosie optreedt van deze lagen.
- Waarschijnlijk heeft het verwijderen van de Deltawerken een grotere impact dan het aanleggen van de opslibgebieden.
- Door de aanleg van de opslibgebieden zal de komberging toenemen. Volgens de theorie van Friedrichs & Aubrey (1988) betekent dit een afname van de vloeddominantie cq. een toename van de eb-dominantie en hierdoor, mogelijk, een afname van de import cq. een toename van de export van sediment.
- Sedimentgehalten: in de Westerschelde is dit ~50 mg/l. Bij het openen van de andere bekkens is een sedimentlading van ~20 mg/l te verwachten. Op de vooroever kan dit gauw oplopen tot ~100 mg/l. Er stroomt ~10-20 Mm³ slib per jaar door de "kustrivier".

Effecten sedimentatie gebieden

- Minder golfoploop (rapport WUR golfreducerende werking kwelders -> Albert)
- Minder "piping" door bredere overgang tussen buitendijks-binnendijks
- Minder zoute kwel binnendijks door langere kwelweg

Aanbevelingen

Haalbaarheid sedimentatiegebieden: waarschijnlijk is er voldoende sediment beschikbaar om de voorgestelde sedimentatiegebieden te laten opslibben. Raadzaam is wel om niet alle gebieden tegelijk te ontpolderen vanwege de beperking in sedimentaanbod, maar stapsgewijs waardoor opslibbing relatief sneller gaat. Mogelijkheid is om een deel van de gebieden te ontpolderen en andere gebieden eerst te laten vervenen door het waterpeil te verhogen (creëren rietmoerassen) en later te ontpolderen. De verwachting is dat sedimentatie sneller gaat als er al een veenpakket ligt. Bovendien ontstaat zo een luwtezone ("gekartelde oever") wat de aanslibbing versneld.

Bij selectie van sedimentatiegebieden moet bekeken worden of er een veenpakket in de ondergrond aanwezig is. Als dit gebied onderwater gezet wordt zal daarbij extra inklinking van de bodem optreden.

Zoetwaterverdeling: effecten op de zoetwaterverdeling in Nederland meenemen. Het verwijderen van de Haringvlietdam beïnvloedt de zoetwaterverdeling van de Randstad. Grote hoeveelheden zoet water worden daar heen gestuurd om "door te spoelen" om zout tegen te gaan en vanwege zoetwater voorziening (landbouw+drinkwater).

Binnendijkse kwel: meenemen invloed sedimentatiegebieden op binnendijkse kwel. Mogelijk vermindert de kwel door de langere kwelweg tussen de zee en de polder en minder piping onder de dijk. -> meer info: Gualbert Oude Essink (Deltares).

Veiligheid Biesbosch: de veiligheid van de Biesbosch is nu niet meegenomen in het natuurlijke scenario. Voor de MKBA moet hier wel rekening mee gehouden worden t.o.v. het Defensieve en Offensieve scenario. In het natuurlijke scenario zal je maatregelen moeten treffen om de Biesbosch veilig te houden en in de andere scenario's niet.

Ontwerp sedimentatiegebieden:

- Geulen/kreken:
 - o uitgraven voormalige kreekpatronen
 - o "voorgraven" kreekbeginselen die georiënteerd liggen in de richting van het getij zodat het zeewater gemakkelijk naar binnen stroomt.
 - o Het is van belang dat er een verhang zeewaarts is zodat het water tijdens laagwater goed kan weglopen. In beoogde sedimentatie gebieden waar het gebied richting het land afloopt vereist dit dus nog graafwerkzaamheden.
- Hoogteligging: hoe lager het sedimentatiegebied ligt, hoe sneller het zal opslibben. Gebieden boven GHWS zullen niet verder opslibben.
- Instroom:
 - o "slibluik" zoals in Lippenbroek
 - o Eén of meerdere openingen in de zeedijk.

- Het verlagen van de zeedijk of het maken van een overstromingsdrempel geeft geen meerwaarde voor wat betreft opslibben omdat dit de invoer van sediment belemmert.
 - Belangrijk uitgangspunt is dat je het hele sedimentatiegebied wil laten onderlopen bij hoogwater en een luwte wilt creëren zodat het sediment in het water kan neerslaan in het sedimentatiegebied.
 - er zijn verschillende mogelijkheden en maatwerk is hierbij belangrijk. De werking van verschillende vormen kan per gebied verschillen.
-
- Combinatie met zandmotor nabij instroom: dit zal het beste werken in een dynamisch deel waar veel transport kan plaatsvinden. Door suppletie van fijn zand nabij de instroomopening zou opslibbing sneller kunnen gaan.

Overige opmerkingen

- Presentatie en terminologie zijn van belang; zaken liggen gevoelig in het Zeeuwse (cf Hedwigepolder)
- Inrichting opslibgebieden hoeft niet per se te worden geoptimaliseerd in termen van sedimentatiesnelheid; dit hangt af wat je wilt. Het kan ecologisch interessanter zijn om het juist langzamer aan te laten slibben.
- Gebieden langs het Veerse meer zijn misschien minder interessant als opslibgebied, omdat er wellicht te weinig sediment door de smalle opening komt.

Concrete acties

- Bepalen waar veen ligt onder potentiële opslibgebieden (Ane Wiersma?)
- Bepalen areaal ingetekende opslibgebieden-> Marijn
- Literatuurstudie ervaring ontpolderingen in NL (Sieperda schor) en UK (?)

Uitvoeren enkele verkennende berekeningen naar potentie opslibgebieden, waarbij het % slib dat afgezet wordt als onzekere factor moet worden meegenomen.